



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA:**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**“DESARROLLO DE UN SENSOR PARA LA DETERMINACIÓN  
DE LA HUMEDAD DEL AISLAMIENTO SÓLIDO DE UN  
TRANSFORMADOR”**

Autor: Daniel Santiago Sanz

Directores: Belén García y Guillermo Robles

LEGANÉS, SEPTIEMBRE 2013



## Índice general

Índice general .....	3
Índice de figuras .....	6
Índice de tablas .....	9
1 Introducción. ....	10
2 El aislamiento del transformador. ....	12
2.1 El aislamiento. ....	12
2.1.1 Papel Kraft.....	13
2.1.2 Aceite mineral. ....	15
2.2 Humedad en los aislamientos del transformador. ....	17
2.2.1 Karl Fischer .....	19
2.3 Espectroscopia dieléctrica.....	20
2.3.1 Respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia. ....	21
2.3.2 Capacidad, pérdida dieléctrica y tangente de delta.....	21
2.3.3 Analizador de diagnostico de aislamiento, IDA 200.....	23
3 Procedimiento experimental.....	25
3.1 Diseño experimental del portamuestras. ....	25
3.2 Preparación de muestras y condiciones experimentales. ....	28
3.3 Procedimiento de medida.....	31
4 Resultados. ....	33
4.1 Medidas de las diferentes humedades.....	33
4.1.1 Medidas de la capacidad.....	35
4.1.2 Medidas de las pérdidas dieléctricas. ....	38
4.1.3 Medidas de tangente de delta. ....	43
4.2 Líneas de tendencia para las curvas de las humedades seleccionadas con frecuencia determinada.....	45

4.2.1	Tendencia de la capacidad para las muestras seleccionadas con frecuencia determinada. ....	46
4.2.2	Tendencia de las pérdidas dieléctricas para las muestras seleccionadas con frecuencia determinada.....	47
4.2.3	Tendencia de la tangente de delta para las muestras seleccionadas con frecuencia determinada.....	49
4.3	Repetividad de las medidas para diferente rango de frecuencias. ....	50
5	Comparación de las medidas sobre papel impregnado con aceite mineral con las medidas sobre papel impregnado con aceite vegetal.....	53
5.1	Comparación de las propiedades del aceite mineral y del aceite vegetal utilizados en el estudio. ....	53
5.2	Medidas de las diferentes humedades en aceite vegetal. ....	55
5.2.1	Comparación de las medidas de la capacidad. ....	57
5.2.2	Comparación de las medidas de las pérdidas dieléctricas. ....	60
5.2.3	Comparación de las medidas de la tangente de delta. ....	62
6	Conclusiones .....	64
7	Bibliografía .....	65



## Índice de figuras

Figura 2-1 En la izquierda se muestra la estructura molecular de la glucosa, mientras que en la derecha se encuentra la estructura molecular de la celulosa. Tomada de [5].	14
Figura 2-2 Karl Fischer para realizar el análisis de humedad de los aislantes. ....	20
Figura 2-3 Circuito dieléctrico equivalente de un aislamiento real. Tomada de [12]. ...	22
Figura 2-4 Equipo IDA 200, utilizado para la realización de las medidas de FDS. Tomada de [14]. ....	23
Figura 2-5 Esquema de conexión utilizado para realizar las medidas de FDS. Ilustración tomada de [14] y modificada. ....	24
Figura 3-1 Dimensiones de la estructura metálica del portamuestras. Tomada de [15]. ....	26
Figura 3-2 Portamuestras con papel impregnado en aceite. Una de las muestras con bocados para analizarla. Tomada de [15] .....	27
Figura 3-3 Cuba de teflón con un portamuestras en su interior. ....	27
Figura 3-4 Mecanismo utilizado para el bobinado de los portamuestras. ....	29
Figura 3-5 Recipiente hermético abierto con muestras en su interior. ....	30
Figura 4-1 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras con distinto contenido de humedad. ....	35
Figura 4-2 Gráfica de la curva de capacidad — frecuencia para una humedad del 3,4%. ....	36
Figura 4-3 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras con distinto contenido de humedad. ....	36
Figura 4-4 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras con distinto contenido de humedad seleccionadas para la caracterización del sensor. ....	38
Figura 4-5 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad. ....	39
Figura 4-6 Gráfica de la curva de pérdida dieléctrica — frecuencia para una humedad del 3,4%. ....	39
Figura 4-7 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad. ....	40
Figura 4-8 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad seleccionadas para la caracterización del sensor. ....	42

Figura 4-9 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad.....	43
Figura 4-10 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad.....	44
Figura 4-11 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad en los puntos de confluencia. ....	45
Figura 4-12 Gráfica de las curvas de tendencia de la capacidad para cada una de las frecuencias determinadas.....	46
Figura 4-13 Gráfica de las curvas de tendencia de las pérdidas dieléctricas para cada una de las frecuencias determinadas. ....	47
Figura 4-14 Gráfica de las curvas de tendencia de la Tg de delta para cada una de las frecuencias determinadas.....	49
Figura 4-15 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para una humedad del 4,4% y varios rangos de frecuencia.....	51
Figura 4-16 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para una humedad del 4,4% y varios rangos de frecuencia. ....	51
Figura 4-17 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para una humedad del 4,4% y varios rangos de frecuencia.....	52
Figura 5-1 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras impregnadas en aceite vegetal con distintos contenidos de humedad. ....	57
Figura 5-2 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral con distintos contenidos de humedad seleccionados para la caracterización del sensor.....	58
Figura 5-3 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral y vegetal con un contenido de humedad del 1%, 4% y 6%. ....	59
Figura 5-4 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras impregnadas en aceite vegetal con distintos contenidos de humedad.....	60
Figura 5-5 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral con distintos contenidos de humedad seleccionados para la caracterización del sensor.....	61
Figura 5-6 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral y vegetal con un contenido de humedad del 1%, 4% y 6%.....	61

Figura 5-7 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras impregnadas en aceite vegetal con distintos contenidos de humedad. ....	62
Figura 5-8 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral con distintos contenidos de humedad. ....	63



## Índice de tablas

Tabla 2-1 Valores típicos del porcentaje en peso de la humedad en el papel según el IEEE. Tomado de [9].	19
Tabla 4-1 Datos del control de cada medida de todas las muestras de humedad impregnadas en aceite mineral.	33
Tabla 5-1 Especificaciones de cada uno de los dos aceites. Tomado de [8, 16].	54
Tabla 5-2 Datos del control de cada medida de todas las muestras de humedad impregnadas en aceite vegetal.	56

## 1 Introducción.

Los transformadores de potencia son máquinas eléctricas cuya función es transvasar la energía eléctrica entre dos sistemas de corriente alterna con diferente nivel de tensión. Estas máquinas son necesarias para reducir las pérdidas de energía, ya que elevan la tensión en los puntos de generación para su transporte y reduciéndola a medida que se acercan al consumo. Estos equipos son necesarios e insustituibles, pero las averías ocasionadas por fallo en el dieléctrico pueden ocasionar sanciones por interrupción de suministros o incluso provocar un incendio. Otro inconveniente es que estos equipos de grandes potencias tienen un coste elevado y son fabricados específicamente para cada instalación pudiendo pasar más de un año para la disposición de uno nuevo. Por ello es conveniente conocer el estado de un transformador y poder anticiparse a una falla del equipo.

Para los transformadores de potencia con tensiones por encima de los 20 kV los hilos de cobre que componen los arrollamientos de estos equipos, se encuentran aislados mediante papel Kraft impregnado con el aceite mineral utilizado como aislante en el interior de la cuba.

Uno de los principales agentes que ocasionan defectos en los aislamientos celulósicos es el agua, ya que produce una aceleración del envejecimiento del aislante y esto provoca un deterioro en el dieléctrico. Como consecuencia de este empeoramiento del aislamiento de los transformadores se pueden producir fallos en el aislante, ocasionando la ruptura dieléctrica del mismo.

Determinar el contenido de humedad en los aislamientos de un transformador sería muy útil, ya que se podría conocer las propiedades físicas tanto del aislamiento sólido como del líquido pudiendo evitar un fallo en el dieléctrico y como consecuencia interrupciones en los suministros o incluso incendios.

En este proyecto se pretende caracterizar un sensor que persigue estimar la humedad en el aislamiento sólido de un transformador. El sensor basa su funcionamiento en analizar el comportamiento que tiene la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta frente a la humedad aplicando el método FDS a un aislamiento testigo situado en el interior del transformador que se verá sometido a las mismas condiciones que el aislamiento sólido del transformador.

El método FDS, consiste en la aplicación de una tensión de frecuencia variable a un aislamiento colocado entre dos electrodos y permitiendo medir la impedancia compleja de la muestra a partir de la medición de la corriente generada. El sensor está compuesto por el papel Kraft impregnado con aceite arrollado sobre un núcleo de aluminio que a lo largo de la memoria se denominará “portamuestras”. En el presente proyecto se realizarán medidas sobre portamuestras preparados con diferentes porcentajes de humedad sumergidos en aceite mineral en una cuba de teflón.

El análisis de las características de diferentes muestras de humedad nos permitirá estudiar la variación de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta, pudiendo caracterizar los datos obtenidos. De esta manera se podrá tener unos datos de referencia, que nos permitan determinar el porcentaje de humedad del papel impregnado en aceite de un equipo y poder comprobar el estado del aislante.

## 2 El aislamiento del transformador.

La vida útil de un transformador de potencia está muy ligada a su aislamiento eléctrico, ya que sin un correcto aislamiento el equipo eléctrico no podría funcionar adecuadamente. Por ello, el deterioro del aislamiento de los transformadores y principalmente el aislamiento sólido, papel impregnado en aceite, afecta de manera considerable a las empresas de generación, transporte y distribución de energía.

Dado que estos equipos son imprescindibles y son activos relevantes para las empresas, se tiene la necesidad de poder evaluar las condiciones de los aislamientos de los transformadores para evitar fallas en el dieléctrico y a su vez todo lo que eso conlleva.

En este apartado se exponen las características del aislamiento sólido y líquido del transformador, la manera en que afecta la humedad a estos aislantes y que parámetros se pueden medir mediante su respuesta dieléctrica con el método de espectroscopia dieléctrica en el dominio de la frecuencia ( FDS del Inglés “Frequency Domain Spectroscopy” ) que se va a utilizar para la realización de este estudio.

### 2.1 El aislamiento.

Un aislamiento eléctrico es un material que pone resistencia al paso de la corriente eléctrica, con una conductividad muy baja. Estos materiales también son denominados dieléctricos.

Este material está capacitado para aguantar esfuerzos producidos por un campo eléctrico, el valor que es capaz de resistir viene determinado por la rigidez dieléctrica del material aislante. Esta propiedad establece el valor del campo eléctrico para el cual se inicia la ruptura dieléctrica del aislante, produciéndose un arco eléctrico.

La misión principal del aislamiento de un transformador es mantener fuera de contacto eléctrico las distintas partes de la máquina eléctrica sometidas a distinto potencial eléctrico. Dependiendo de las tensiones que están sometidas las espiras de cobre que componen los arrollamientos del transformador se encuentran aislados de diferente

manera, para tensiones inferiores a 20 kV los arrollamientos están aislados por un barniz o esmalte, mientras que para tensiones mayores el aislamiento está compuesto por papel impregnado en aceite [1].

Una vez que se conoce la utilidad de los aislantes eléctricos, en los siguientes apartados se van a estudiar las características particulares del aislamiento sólido ( papel Kraft ) y el aislamiento líquido ( aceite mineral ) que se han utilizado para la realización de este proyecto.

### 2.1.1 Papel Kraft.

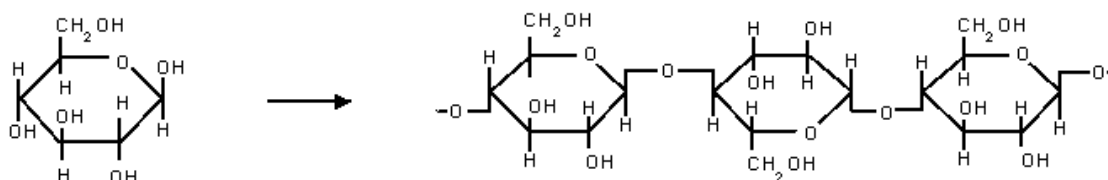
En la actualidad se han desarrollado nuevos aislantes con unas propiedades dieléctricas y térmicas muy buenas, aunque estos aislantes se encuentran aún en estudio, su elevado precio hace que las buenas características que proporcionan la combinación del aislante papel-aceite constituyan el dieléctrico de los transformadores [2].

El aislamiento sólido que se ha utilizado en este estudio es el papel Kraft, este aislante es fabricado a base de pulpa de madera compuesta principalmente por celulosa (75% - 85%), con un menor porcentaje de hemicelulosa (10% - 20%), lignina (2% - 6%) y compuestos inorgánicos ( $<0,5\%$ ) [2]. Este aislamiento es tratado por el método Kraft, papel térmicamente mejorados a partir de una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) [3].

Las funciones principales del papel Kraft como aislamiento del transformador son; recubrir los arrollamientos metálicos en tensión, dividir los espacios de aceite consiguiendo aguantar mayores gradientes de campo y aportar rigidez mecánica [2].

La principal desventaja del papel es que es un material muy higroscópico, eso quiere decir que tiene una gran capacidad para absorber la humedad en contacto con la atmósfera o cualquier medio húmedo [2]. Además, este tipo de aislamiento es un material poroso, que permite eliminar a través del vacío los gases y la humedad contenida en el papel consiguiendo mediante la impregnación de aceite que estas cavidades se rellenen [4].

El papel es un polímero que está compuesto por celulosa, compuesto a partir de la repetición de monómeros de glucosa. En los transformadores recién fabricados el aislante sólido está formado por cadenas poliméricas con una longitud aproximada de 800 monómeros, a esta longitud se denomina grado de polimerización [2, 4].



**Figura 2-1** En la izquierda se muestra la estructura molecular de la glucosa, mientras que en la derecha se encuentra la estructura molecular de la celulosa. Tomada de [5].

Una de las características importantes de este aislante es la resistencia a la tracción mecánica. Esta propiedad depende de su grado de polimerización, cuando el papel presenta una longitud de las cadenas poliméricas inferior a 200 monómeros, no se puede garantizar que los esfuerzos de repulsión producidos por un cortocircuito puedan ser soportados por el aislante. El grado de polimerización se ve afectado por la temperatura y el agua, esto produce la ruptura de las cadenas poliméricas en una reacción denominada hidrólisis, que disminuye la longitud de monómeros [1].

La hidrólisis de una cadena celulosa produce tres moléculas de agua ( $H_2O$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y otros compuestos llamados furanos. Esta reacción se realiza de forma más intensa a medida que aumenta la temperatura reduciendo la vida del aislante de manera drástica [1].

Otra de las características del papel es que tiene una constante dieléctrica relativamente elevada ya que únicamente requeriría dos de las tres partes que necesitaría el aceite si ocuparan el mismo espacio [4].

Por otra parte la rigidez dieléctrica que tiene el papel impregnado en aceite es mayor que la de sus componentes si los se comparan por separado. La constitución del papel permite al aceite introducirse entre fibras y laminas, consiguiendo una rigidez dieléctrica mayor [3].

Los materiales aislantes sólidos contienen una cantidad de agua mayor, pudiendo llegar a ser unas 200 veces superior a la cantidad de agua existente en el aceite [4]. Aunque esta proporción varía en el transcurso de funcionamiento del transformador por variaciones de temperatura en el sistema de aislamiento papel – aceite. Cuando la temperatura aumenta el papel absorbe humedad del aceite mientras que cuando la temperatura desciende el proceso se produce de manera inversa [2].

En definitiva el contenido de humedad en el papel impregnado en aceite se puede utilizar como indicador del estado del aislante.

### **2.1.2 Aceite mineral.**

Actualmente el aceite mineral es un aislante fundamental para el funcionamiento de transformadores de potencia. Esto es debido a sus buenas propiedades físicas, químicas y dieléctricas.

El aceite mineral procede de la refinación de hidrocarburos, recogidos cuando se produce la destilación del petróleo. Después se le somete a varios procesos químicos para mejorar sus propiedades dieléctricas y conseguir un alto grado de estabilidad química. Este aislante al ser un derivado del petróleo, tiene disponibilidad limitada y su precio de venta varía según el del petróleo [3].

Un inconveniente del aceite mineral es que sus residuos son muy contaminantes y no deben ser vertidos al medio ambiente.

Las funciones principales del aislante líquido son; ejercer como aislamiento dieléctrico, impregnar el papel aislante protegiéndolo de un contacto directo con la humedad y refrigerar el transformador al circular por la cuba [6].

El aceite mineral es un buen dieléctrico gracias a su elevada rigidez dieléctrica que permite aguantar esfuerzos producidos por un campo eléctrico y su reducida permitividad hace que aumente el campo eléctrico en su seno reduciendo ante un fallo

de aislamiento las probabilidades de ocurrir una ruptura dieléctrica en el papel impregnado en aceite, ya que la permitividad del papel es mayor [1].

Una particularidad del aceite mineral es que el aislante eléctrico es regenerable. Después de producirse un arco eléctrico en el aceite, una vez que se extinga el arco y las partículas quemadas se hayan precipitado el aislante recupera su rigidez dieléctrica [1].

Otra función de este aislante es la refrigeración del transformador, esto se debe a que gracias a su reducida viscosidad y tener una elevada constante de transmisión de calor por conducción el aceite mineral sea un buen refrigerante. Al tener un bajo índice de viscosidad facilita la formación de corrientes conduciendo el calor de los puntos calientes del transformador hacia el exterior. Mientras que una elevada constante de transmisión de calor evita que se incremente la temperatura de forma rápida, que se producen cuando el transformador está sobrecargado generando un aumento de calor [1].

Pero no todas las propiedades térmicas del aceite mineral son buenas, el punto de inflamación de este aislante es relativamente bajo. Esta propiedad es una característica importante, ya que en el caso de provocarse una falla por ruptura del dieléctrico se puede producir un incendio o incluso una explosión en el interior del transformador.

Existen diferentes factores que hacen envejecer al aceite. El oxígeno en contacto con el aceite mediante una oxidación produce lodos y ácidos. La temperatura activa la reacción de oxidación y la pirolisis del aceite. Las rupturas de dieléctrico, la luz, el agua y las partículas en suspensión generadas por la degradación del aceite también producen el envejecimiento del aceite [1]. Algunos metales, como por ejemplo el cobre, favorecen las reacciones del envejecimiento del aislante porque actúan como catalizadores acelerando el proceso de oxidación del aceite [7].

Los ácidos son compuestos polares solubles en el aceite que provocan que disminuya su rigidez dieléctrica y empeoran sus propiedades para evacuar calor, produciendo que la temperatura del aceite aumente con mayor rapidez y con ello acelerando el proceso de envejecimiento del aislante [7].



Los lodos son sedimentos óxidos que enturbian el aceite empeoran la refrigeración, ya que se depositan en los arrollamientos dificultando su evacuación de calor. Debido a esto, aumenta la temperatura en el interior y por lo tanto aumenta la velocidad de envejecimiento del aceite [7].

El agua aparece como subproducto en las reacciones de oxidación del aceite, por la descomposición del papel y por el contacto del aceite con el exterior. La transferencia de agua del papel al aceite crece con la temperatura. El aumento de la humedad produce una reducción drástica de la rigidez dieléctrica del aceite. Por ello el agua es el agente más dañino que contribuye a la pérdida de propiedades del aislamiento [1].

Además, el aceite sirve para indicar el estado del aislamiento del transformador, ya que se puede obtener un análisis de los compuestos disueltos en el aceite [1].

Para el estudio realizado en este estudio se ha utilizado el aceite mineral Nytro Taurus de Nynas [8].

## **2.2 Humedad en los aislamientos del transformador.**

Una vez estudiado las propiedades y funciones de los aislantes de un transformador, se conoce que la humedad contenida en los aislamientos de los transformadores es un factor que determina el estado del mismo.

La vida del transformador está determinada según el estado de su aislamiento celulósico, principalmente porque cuando el papel impregnado en aceite envejece no es capaz de soportar los esfuerzos de tracción mecánica ante un cortocircuito.

Se determina como humedad relativa del aceite, al contenido de agua disuelto en el aislante líquido respecto a la cantidad de humedad que puede soportar el aislante, aunque normalmente la presencia de humedad en el aceite se mida en partes por millón (ppm). En cambio para el papel impregnado en aceite, la humedad se determina según el porcentaje en peso [4].

Los aislantes que constituyen el transformador se comportan de manera diferente a la hora del reparto de humedad. Esto se debe a que los aislamientos celulósicos son hidrófilos, mientras que el aceite es hidrófobo. Por estas propiedades, la mayor parte de la humedad está contenida en el papel y una pequeña parte en el aceite [2].

El agua aparece en el transformador como subproducto en las reacciones de oxidación del aceite, por la descomposición del papel y por el contacto del aceite con el exterior. A continuación se exponen los efectos que produce el contenido de humedad en los aislamientos de un transformador [1, 2, 3, 4, 7]:

- Favorece la formación en el aceite de ácidos y lodos.
- Acelera la oxidación del aceite.
- Disminuye drásticamente la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes.
- Provoca la aparición de burbujas en el aceite que pueden ocasionar descargas parciales.
- Disminuye el grado de polimerización (hidrólisis) y como consecuencia la resistencia a la tracción del papel.
- Reduce la tensión de ruptura dieléctrica del aceite y de la resistividad.
- Aumenta el factor de las pérdidas dieléctricas.

Además de estos efectos la presencia de humedad en los aislamientos del transformador supone una doble desventaja, esto se debe a que el agua aumenta la velocidad de envejecimiento produciendo a su vez mayor contenido de agua [4].

En la siguiente tabla se exponen los valores típicos de humedad en el papel impregnado en aceite para transformadores de potencia según el IEEE. Este valor se expresa mediante el tanto por ciento en peso del papel.

<i>Estado del aislamiento en el transformador</i>	<i>Porcentaje en peso de la humedad en el papel (%)</i>
<i>Transformador nuevo</i>	< 1
<i>Aislamiento seco</i>	< 2
<i>Moderadamente húmedo</i>	2 - 3
<i>Húmedo</i>	3 – 4,5
<i>Aislamiento excesivamente húmedo</i>	> 4,5

**Tabla 2-1 Valores típicos del porcentaje en peso de la humedad en el papel según el IEEE.**

Tomado de [9].

En los transformadores no se puede acceder a los arrollamientos para conocer el porcentaje de humedad del papel aislante. Actualmente se realizan análisis de aceites para determinar el envejecimiento del aislante y se realizan estudios de la respuesta dieléctrica de los materiales aislantes.

### 2.2.1 Karl Fischer

Para determinar la humedad contenida en los aislamientos que se han empleado en este estudio, se utiliza el método coulombimétrico de Karl Fischer. Este método es usado en varios sectores para conocer la humedad contenida en diversos productos [4].

Existe una norma española que se utiliza para el uso del coulómetro Karl Fisher, esta norma es específica para los ensayos realizados para aislamiento líquido, papeles y cartones aislantes impregnados en aceite. Según esta norma, el resultado que se obtiene en estos ensayos indica el valor del agua contenida en la muestra por el método coulombimétrico de Karl Fischer [4].

En la siguiente figura se observa el equipo Karl Fischer, que se encuentra situado dentro de la zona de control de humedad del laboratorio de la Universidad Carlos III de Madrid.

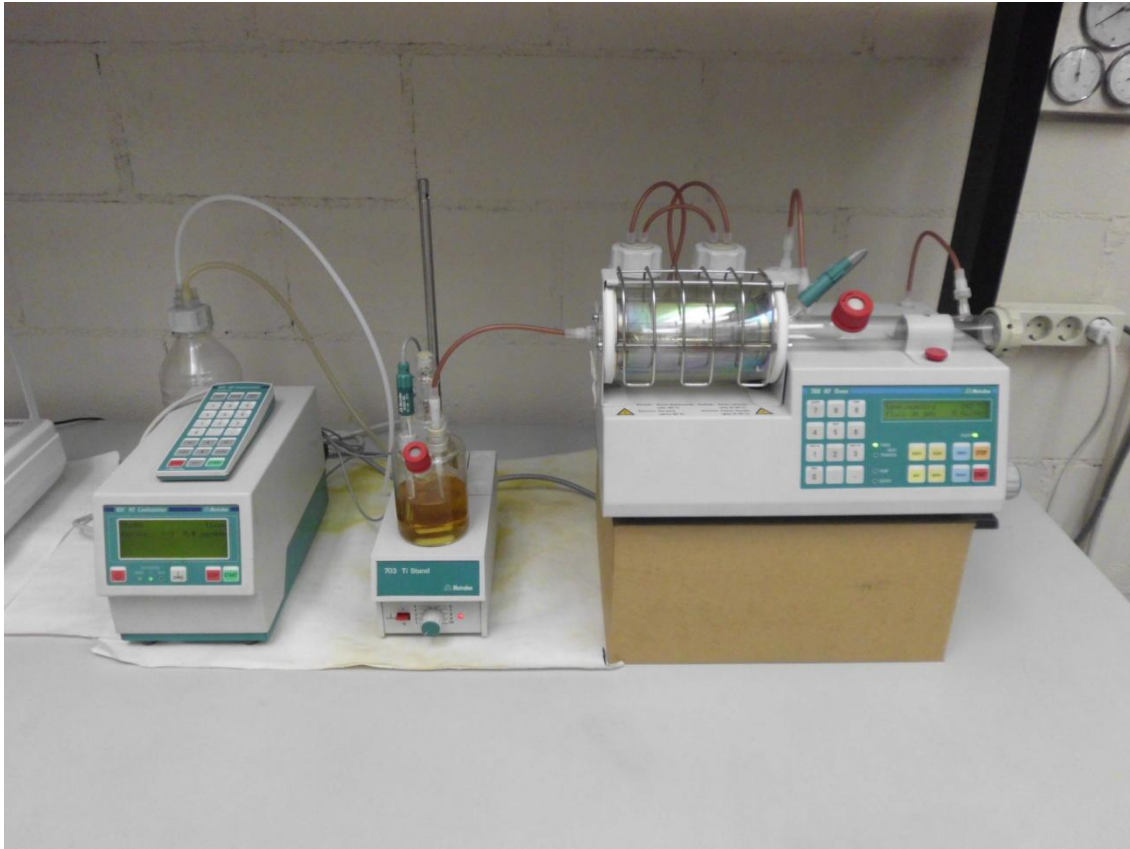


Figura 2-2 Karl Fischer para realizar el análisis de humedad de los aislantes.

### 2.3 Espectroscopia dieléctrica.

La realización de un análisis de espectroscopia dieléctrica consiste en obtener la respuesta dieléctrica de un material al aplicarle un campo variable en función del tiempo. En este estudio se analiza la respuesta dieléctrica de una magnitud macroscópica, la permitividad dieléctrica, de la cual se puede obtener información de sus magnitudes microscópicas a partir del análisis en función de la temperatura y la frecuencia [3].

La respuesta dieléctrica de un material aislante nos permite conocer la humedad y el estado de envejecimiento del aislamiento de los transformadores, ya que gracias a este estudio se puede conocer los valores de las principales propiedades dieléctricas del aislante de un transformador [10].

Para conocer la respuesta dieléctrica de un material se estudian los procesos de polarización del dieléctrico mediante la medida de corriente que se genera al aplicar un campo eléctrico variable. Existen dos métodos para estudiar y caracterizar la respuesta dieléctrica del material: respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo y respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia [3].

En este documento se ha utilizado el método de respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia. A continuación se explica en qué consiste, las características que nos permite conocer y el equipo utilizado para su realización.

### **2.3.1 Respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia.**

El método empleado es el resultado de una transición analítica que se obtiene utilizando la transformada de Fourier o de Laplace a partir de la respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo [3, 11].

Esta técnica consiste en el análisis de los procesos lentos de polarización del dieléctrico mediante la medida de corriente que se genera al aplicar un campo eléctrico sinusoidal a una frecuencia constante durante el tiempo necesario para realizar la medida para la frecuencia aplicada [10, 11].

Las variables que se van a estudiar para poder caracterizar el aislante de los materiales a analizar son: la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta.

### **2.3.2 Capacidad, pérdida dieléctrica y tangente de delta.**

Como se ha explicado anteriormente, el dieléctrico de los transformadores es el encargado de aislar las partes metálicas con diferente nivel de tensión. Un aislamiento que se encuentra realizando una separación entre dos elementos conductores de electricidad se puede representar mediante un elemento capacitivo [12]. La capacidad se denomina como la propiedad que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica. El valor de la capacidad siempre es positivo y depende de dos factores; de la geometría

que esté constituido el condensador utilizado y del dieléctrico que se encuentre en el interior entre las dos superficies del condensador [13].

En la realidad los aislamientos eléctricos no se comportan de manera ideal, esto implica que todo sistema real de aislamiento tiene asociadas unas pérdidas que se representan mediante una resistencia en paralelo con el condensador (también en serie, aunque no es lo habitual). Esta resistencia caracteriza las pérdidas eléctricas de un aislamiento real [12].

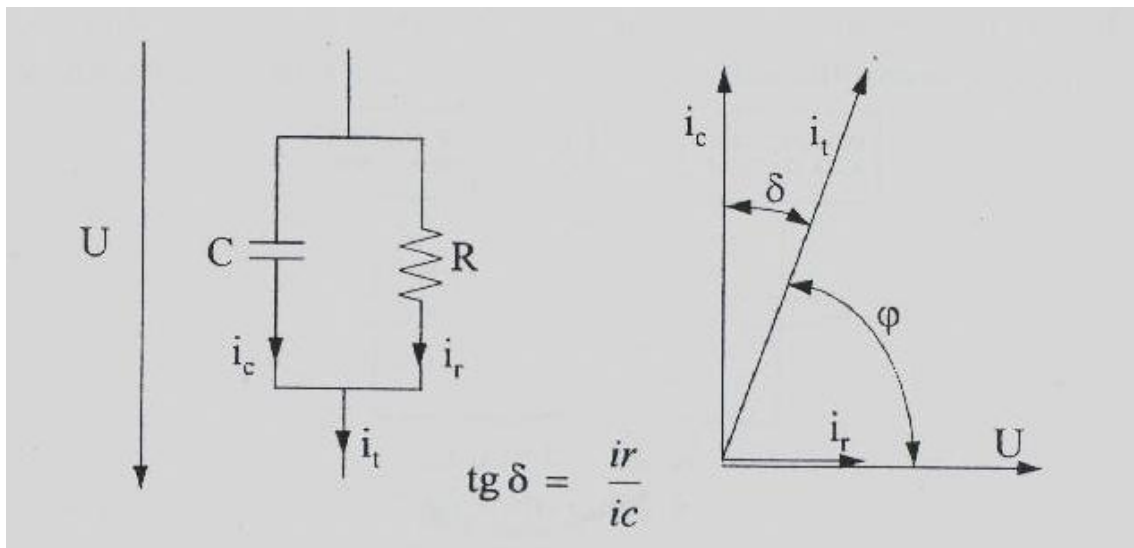


Figura 2-3 Circuito dieléctrico equivalente de un aislamiento real. Tomada de [12].

En un dieléctrico ideal, la intensidad consumida por el condensador está  $90^\circ$  adelantada respecto a la tensión aplicada. En este caso, el condensador no consume potencia activa y únicamente realiza un intercambio de potencia reactiva con la fuente. Sin embargo en un dieléctrico real debido a las pérdidas dieléctricas, la corriente consumida por el condensador no desfasa  $90^\circ$  respecto de la tensión, sino que tiene un ángulo menor denominado  $\varphi$ . El ángulo complementario a  $\varphi$  define la magnitud de las pérdidas dieléctricas y su símbolo es  $\delta$ . La tangente de  $\delta$  es proporcional a las pérdidas dieléctricas de un aislante, siendo un indicador del estado que se encuentra el dieléctrico ya que a medida que el aislamiento se deteriora el ángulo  $\delta$  se hace mayor y a su vez la  $\text{tg}$  de  $\delta$  [1].

### 2.3.3 Analizador de diagnostico de aislamiento, IDA 200.

En este proyecto se ha utilizado el equipo IDA 200 para realizar las medidas en el laboratorio, permitiendo conocer la respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia para los aislantes analizados. Este equipo nos permite conocer el valor de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta para un rango de frecuencias de 0,1 mHz – 1 kHz y aplicando una tensión entre 10 V – 200 V [14].

En la siguiente ilustración se puede apreciar el aspecto del equipo IDA 200.

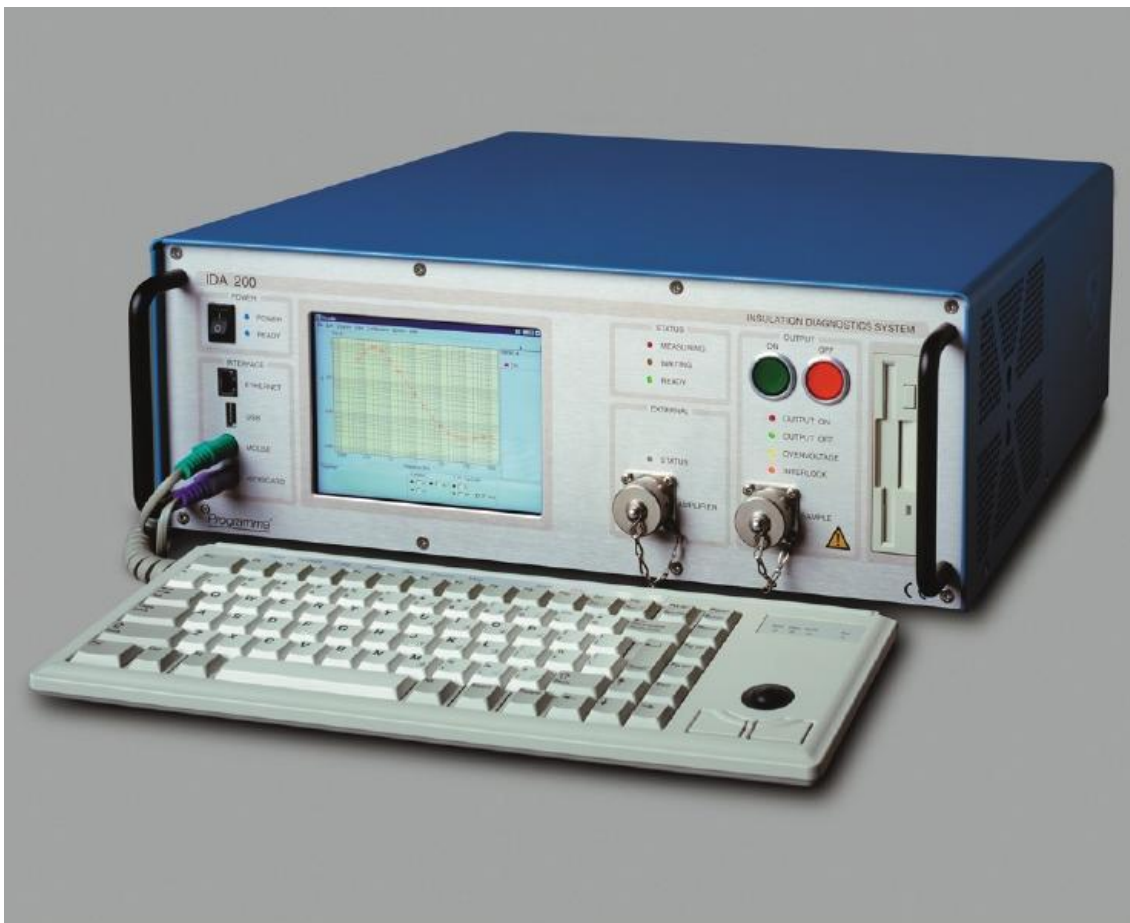


Figura 2-4 Equipo IDA 200, utilizado para la realización de las medidas de FDS. Tomada de [14].

Gracias a la pantalla que dispone este equipo se pueden observar los resultados de las medidas en tiempo real y a su vez compararlos con medidas anteriores.

Este equipo también dispone de un programa denominado MODS, una herramienta que permite el análisis de resultados de medidas mediante gráficas y tablas con los valores de las características analizadas.

En la siguiente figura se expone el esquema de medida que se ha utilizado para la realización de las medidas de FDS con el equipo.

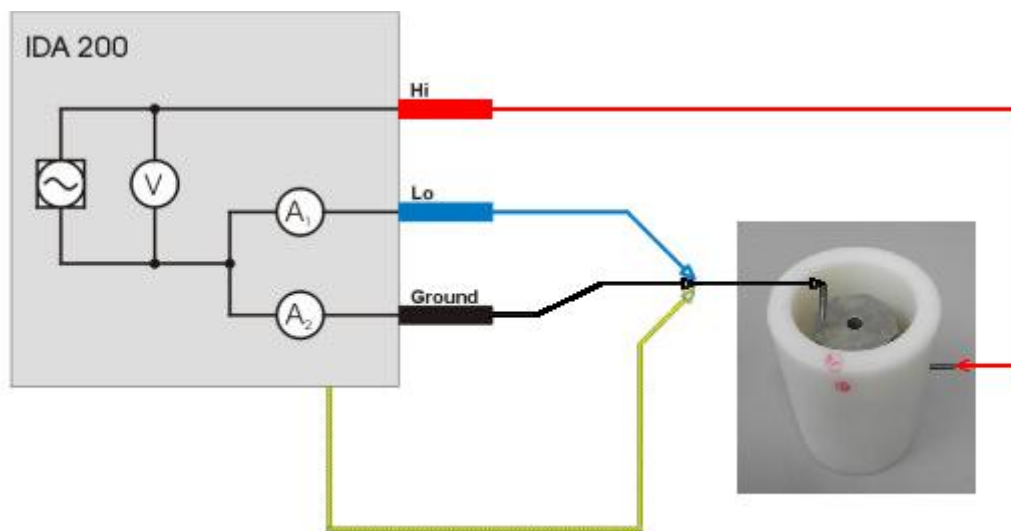


Figura 2-5 Esquema de conexión utilizado para realizar las medidas de FDS. Ilustración tomada de [14] y modificada.



### 3 Procedimiento experimental.

En los siguientes tres apartados se explica cómo se han realizado los portamuestras, la preparación de las muestras con sus condiciones de distintas humedades y el procedimiento que se ejecuta para la realización de las medidas de FDS.

#### 3.1 Diseño experimental del portamuestras.

La estructura del portamuestras fue diseñada por el grupo de investigación DIAMAT (Diagnosis de máquinas eléctricas, cables y materiales aislantes) del departamento de Ingeniería. Ésta se realizó siguiendo unas pautas con el objetivo de caracterizar los aislamientos sólidos en transformadores bajo condiciones de no equilibrio. En el artículo referenciado en la bibliografía se puede observar el estudio completo que se realizó [15].

A continuación se expone en qué consiste el sensor para determinar el porcentaje de humedad del papel impregnado en aceite mineral.

Para estudiar la variación de la permitividad del dieléctrico en un rango de frecuencia de 1 mHz – 1 kHz, se empleará el método FDS anteriormente explicado. Esto se puede conseguir mediante sensores capacitivos, ya que la relación entre la permitividad del dieléctrico y la impedancia es una constante que depende de la geometría del sensor y de los electrodos.

El portamuestras es una estructura cilíndrica octogonal fabricada con aluminio y su función es hacer de electrodo de medida para la caracterización dieléctrica de las muestras, así como servir de soporte al papel Kraft que se caracterizará durante las medidas.

El condensador está formado por el núcleo de aluminio, el papel impregnado en aceite y una estructura metálica que envuelve el dieléctrico en la parte exterior formando el condensador cilíndrico. Hay que tener en cuenta que el objetivo último del sensor es permitir caracterizar la humedad del aislamiento principal del transformador, y debido a

los transitorios térmicos producidos por la variación de la carga, la humedad migra entre el papel y el aceite. Por ello, es importante que los electrodos del sensor no obstruyan la migración de la humedad desde el sensor hacia el aceite.

En el exterior del condensador se coloca una malla metálica de acero inoxidable AISI 304 con el objetivo de ofrecer una estructura metálica densa para que la capacidad no sea despreciable y a la vez con un orificio lo suficientemente grande para que permita la migración de humedad desde el aislamiento sólido del sensor hacia el aceite. En el estudio realizado se compararon tres mallas de tamaño diferente de apertura y se escogió la que otorgaba valores similares de capacidad y de pérdidas dieléctricas con el electrodo sólido, con un tamaño de apertura de 0,75 x 0,75 mm.

En la siguiente ilustración se puede observar las dimensiones del portamuestras:

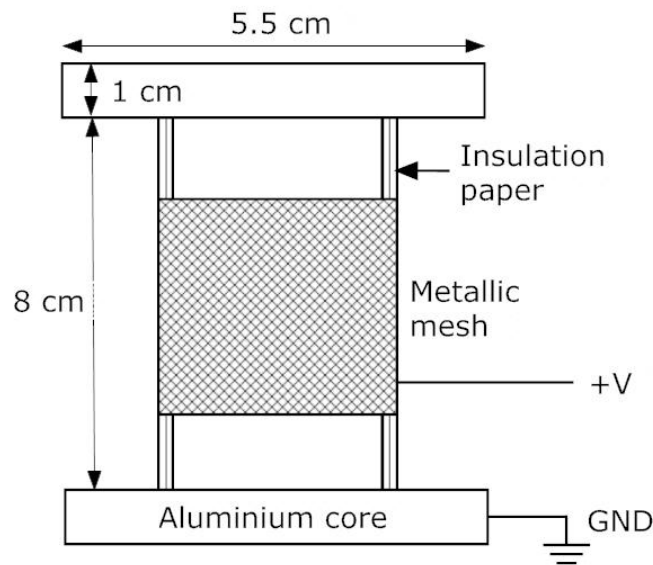


Figura 3-1 Dimensiones de la estructura metálica del portamuestras.  
Tomada de [15].

Para finalizar y poder realizar las medidas de FDS el portamuestras se introduce en una cuba realizada con teflón en la que se inserta el aceite mineral. En esta cuba se realiza un orificio en un lateral donde se introduce la conexión directamente a la malla exterior del condensador. El otro polo se encuentra en la parte superior del portamuestras y se conectará a tierra durante las medidas.

En las siguientes fotografías se pueden observar el tipo de portamuestras y la cuba de teflón que se utilizará para realizar las medidas de FDS.



Figura 3-2 Portamuestras con papel impregnado en aceite. Una de las muestras con bocados para analizarla. Tomada de [15]

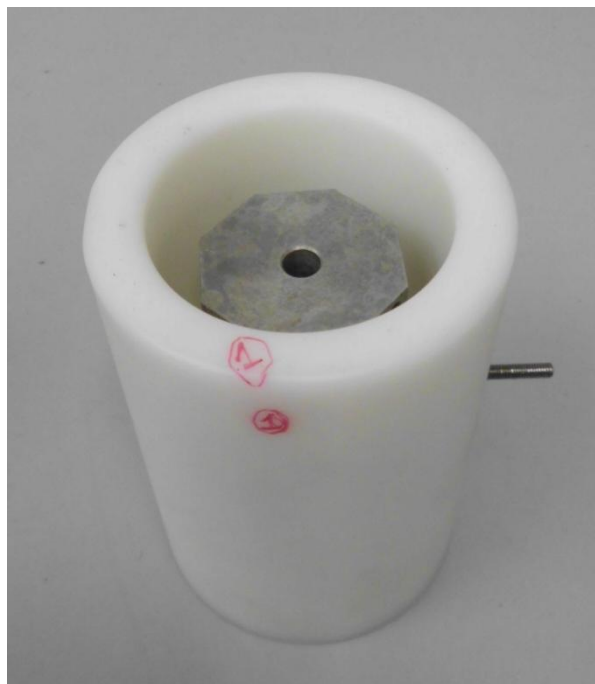


Figura 3-3 Cuba de teflón con un portamuestras en su interior.

### 3.2 Preparación de muestras y condiciones experimentales.

Después de conocer y ejecutar el diseño que se ha realizado para los portamuestras, se deben preparar las muestras con las diferentes humedades para realizar las medidas de FDS.

La secuencia de preparación de las muestras busca garantizar que todas las pruebas se basen en parámetros conocidos y se realicen con una misma metodología. Para ellos se van a seguir las siguientes indicaciones:

El primer paso es arrollar el papel Kraft alrededor del núcleo de aluminio. La primera capa se fija al soporte con una banda adhesiva y luego el cilindro se bobina en una máquina para conseguir igual presión de apriete y el mismo número de vueltas en todos los portamuestras.

- Se comenzará bobinando un total de 18 portamuestras, utilizando tres para cada una de las humedades de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% y 6%. Uno de ellos se utilizará de muestra patrón para poder comprobar la humedad de las otras dos sin deteriorarlas, ya que se guardarán en el mismo recipiente hermético. Los dos restantes se emplearán para realizar las medidas FDS.
- El bobinado corresponde a 40 capas de papel Kraft nuevo y sin tratar formando un espesor de 3 mm. La primera capa se fija al soporte con una banda adhesiva y luego este proceso se realiza con un aparato realizado expresamente para bobinar los portamuestras. En la siguiente ilustración se puede observar el mecanismo:

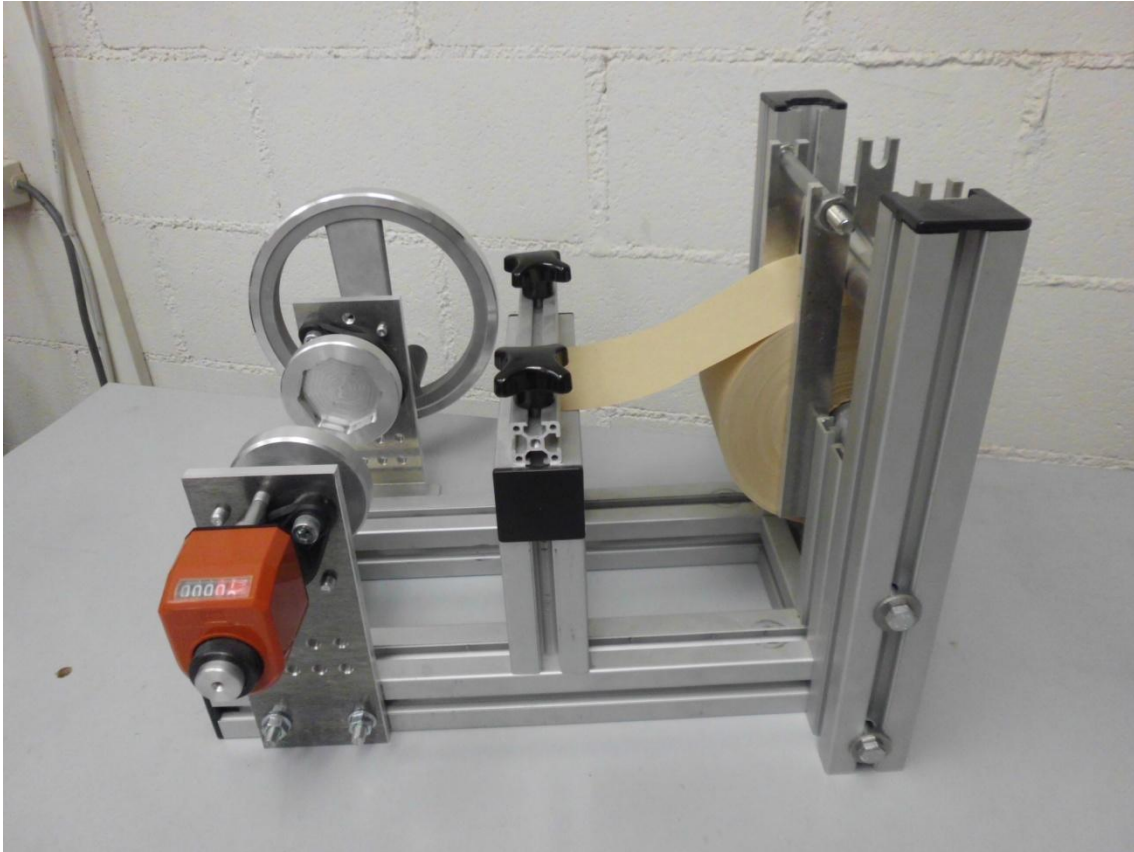


Figura 3-4 Mecanismo utilizado para el bobinado de los portamuestras.

- Después de que todos los portamuestras estén bobinados, se introducen en la estufa de vacío a 70 °C durante 24 horas para secarlos y así se garantiza que todos parten con un porcentaje de humedad inicial muy baja o casi nula. Esto se debe a que inicialmente la humedad de una muestra expuesta al ambiente es elevada, en torno a un 7 – 8% de humedad inicial.
- A continuación se preparan las disoluciones de sales en los recipientes herméticos para su humectación y posterior conservación de las muestras. Se utilizan dos tipos de sales, para preparar las muestras con humedades de 1% – 4% se utilizará una disolución de sales de Fluoruro de cesio, mientras que para las humedades de 5% – 6% se usará una disolución de sales de Bromuro de litio.



**Figura 3-5 Recipiente hermético abierto con muestras en su interior.**

- Una vez que se han preparado, tanto los portamuestras como las disoluciones de sales, se dejan en los recipientes herméticos el tiempo adecuado hasta que las muestras se humedezcan hasta el porcentaje indicado en cada caso, que suele ser de unos 30 días, comprobando de forma periódica la muestra patrón de referencia.
- Cuando las muestras hayan obtenido la humedad deseada, en la zona de humedad controlada del laboratorio se les fija la malla que hará de electrodo exterior mediante bridas para asegurar un ajuste y se vuelven a introducir en los recipientes herméticos.

Una vez que se han preparado los portamuestras, se conservan en los recipientes herméticos, tanto antes como después de los ensayos FDS. Y realizando una medida de humedad en el papel de las muestras patrones previa a la iniciación de los ensayos FDS finales, para disponer de una referencia de humedad cuando se realice la medida FDS.

### 3.3 Procedimiento de medida.

Una vez que se han preparado todos los portamuestras con sus correspondientes humedades, se procede a realizar las medidas FDS mediante la siguiente metodología que se ha seguido para las mediciones de los diferentes porcentajes de humedad.

Todos los trabajos se deben realizar dentro de la zona de humedad controlada del laboratorio para evitar que nuestras muestras de papel sufran un cambio de humedad. Se saca el portamuestra del contenedor de la solución salina y se introduce en la cuba de teflón. Una vez introducido el portamuestras se deberá rellenar la cuba con aceite mineral hasta que la parte superior quede cubierta de aceite mineral. Antes de introducir la cuba en el horno se toma una muestra de aceite y se procede a analizar con Karl Fischer.

Una vez que se tiene preparada la cuba, se procede a introducirla en el horno a 30 °C, colocando los dos conductores mediante unos cocodrilos y sacándolos por la parte de detrás del horno para poder realizar la medida de FDS.

El portamuestras permanecerá durante 15 horas en el horno hasta que se realice la medida de FDS al día siguiente, para que el papel pueda impregnarse totalmente de aceite y los parámetros de la muestra se estabilicen. En este momento se toma una muestra del aceite y se analiza con Karl Fischer para determinar su contenido de humedad.

Habiendo pasado el tiempo establecido se realiza la medida FDS sobre la muestra con una tensión de salida del IDA de 100 V. Se efectúa una primera medida con un rango de frecuencias de 10 mHz – 1 kHz y se comprueba que la medida es coherente y procediendo a realizar la segunda medida con un rango de frecuencias de 1 mHz – 1 kHz. Si las dos medidas en el mismo rango de frecuencias se solapan no se realizará otra medida, sin embargo, si las dos medidas no se solapan o se observa algún resultado que no se espera, se procederá a realizar una tercera medida con un rango de frecuencias de 1 mHz – 1 kHz.



Tras realizar la medida FDS se vuelve a tomar una muestra del aceite y se analiza con Karl Fischer para comprobar que la humedad del aceite no varía considerablemente. También se toman dos muestras de papel a distintas alturas para caracterizar su humedad y poder determinar qué porcentaje de humedad tiene el papel para compararlo con las demás muestras.



## 4 Resultados.

Los resultados de las diferentes muestras de humedades se han obtenido a partir de los ensayos realizados con el equipo IDA 200, mediante medidas FDS en el rango de frecuencias de 1 mHz – 1 kHz. A continuación se exponen los resultados representados en gráficas en las que se muestran la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta medidas sobre muestras preparadas con distintos porcentajes de humedad y para las diferentes características estudiadas.

### 4.1 Medidas de las diferentes humedades.

En la siguiente tabla se exponen los datos del control que se realiza para cada medida de todas las muestras. Las partes por millón de agua en el aceite antes y después de medir FDS, el porcentaje de humedad en el papel de las distintas muestras y la duración de la medida FDS.

	<i>Humedad en el aceite antes de medir FDS (ppm)</i>	<i>Humedad en el aceite después de medir FDS (ppm)</i>	<i>Medida de humedad en el papel (%)</i>	<i>Duración de la medida (h min s)</i>
<i>Primera medida 1% humedad</i>	13,6	13,8	1,31	1:04:46
<i>Segunda medida 1% humedad</i>	13,8	13,9	0,83	1:04:38
<i>Primera medida 2% humedad</i>	13,1	13,7	2,3	1:04:23
<i>Segunda medida 2% humedad</i>	13,5	13,4	2,4	1:04:30
<i>Primera medida 3% humedad</i>	14	13,9	3,4	1:06:04
<i>Segunda medida 3% humedad</i>	13,5	13,6	3,2	1:04:32
<i>Primera medida 4% humedad</i>	13,9	14,2	4,4	1:04:01
<i>Segunda medida 4% humedad</i>	14	13,7	4,3	1:04:32
<i>Primera medida 5% humedad</i>	14,2	14,1	5	1:04:38
<i>Segunda medida 5% humedad</i>	13,9	14,1	5,44	1:04:46
<i>Primera medida 6% humedad</i>	14	14,3	6,4	1:05:02
<i>Segunda medida 6% humedad</i>	13,7	14,1	6,4	1:05:39

**Tabla 4-1 Datos del control de cada medida de todas las muestras de humedad impregnadas en aceite mineral.**

Como se puede ver en esta tabla, la humedad del aceite mineral no varía de manera significativa entre las distintas medidas de FDS, ni tampoco durante el tiempo que transcurre al realizar cada una de las medidas. La humedad en el papel se mantiene en un rango entre 13,1- 14,2 ppm.

El tiempo que tarda el equipo IDA 200 en realizar las medidas de FDS de las muestras en el rango de frecuencias de 1 mHz – 1 kHz, se encuentra en torno a una hora y cinco minutos. Este tiempo es uniforme para todas las medidas realizadas.

Una vez que se determina la humedad de las distintas muestras con Karl Fischer, se observa que para la mayoría de las muestras preparadas con un mismo porcentaje de humedad existen pequeñas diferencias en contenido en agua. Esta diferencia puede ser positiva y aportar un abanico de datos más amplio para los parámetros de referencia del sensor y a su vez observar la sensibilidad que existe entre ellas respecto a las diferentes características que se van a analizar.

A continuación se exponen los datos obtenidos para la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta representados en gráficos, utilizando el mismo color para las muestras del mismo porcentaje de humedad.

#### 4.1.1 Medidas de la capacidad.

Los datos obtenidos en las medidas de la capacidad se representan en esta gráfica:

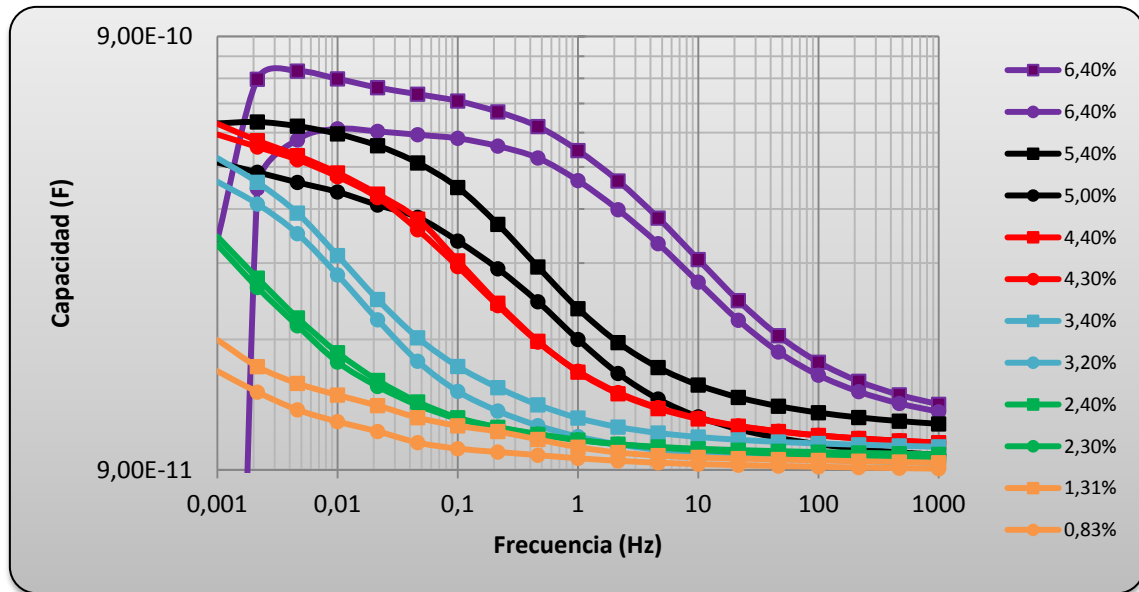


Figura 4-1 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras con distinto contenido de humedad.

A partir de los datos obtenidos del IDA 200 se analiza cómo varía la capacidad en función de la frecuencia, de mayor a menor frecuencia.

Como se puede observar en la gráfica para todas las curvas de humedades, a medida que se disminuye la frecuencia, la capacidad tiende a aumentar. Es cierto que este crecimiento no es igual para cada intervalo de frecuencias.

En la siguiente gráfica con una única muestra y caracterizando únicamente siete puntos de frecuencia se puede apreciar mejor este aumento:

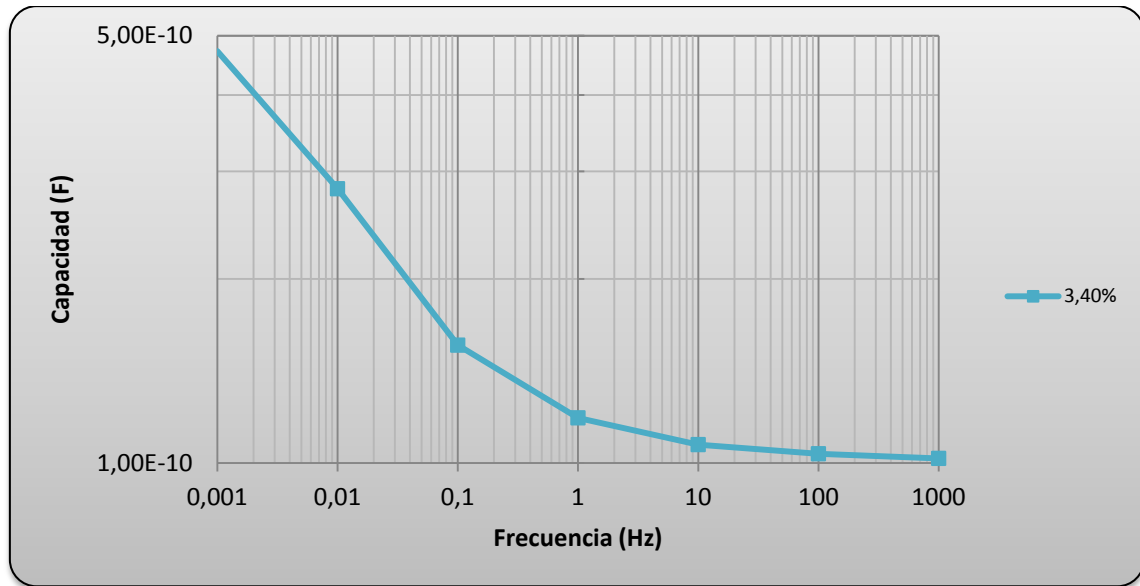


Figura 4-2 Gráfica de la curva de capacidad — frecuencia para una humedad del 3,4%.

Se aprecia que a medida que disminuye la frecuencia la capacidad aumenta. No obstante, entre el rango de frecuencias de 1 Hz – 1 kHz el aumento de la capacidad es muy pequeño, sin embargo, entre el rango de 1 mHz – 1 Hz la capacidad crece de manera considerable.

También se debe analizar el comportamiento de la capacidad en función del porcentaje de humedad de la muestra. Para ello se utiliza la siguiente gráfica en la que se puede comparar tres humedades diferentes:

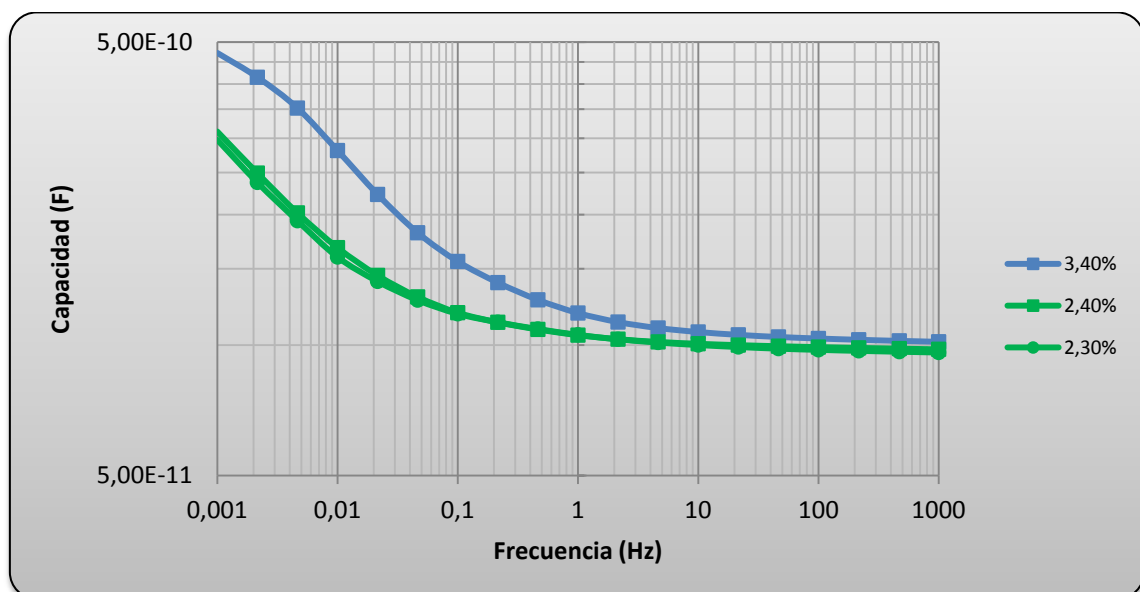


Figura 4-3 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras con distinto contenido de humedad.

En esta ilustración se realiza dos comparaciones. Una de ellas con dos humedades muy parecidas y otra con dos humedades de diferente porcentaje de humedad significativa.

En la primera comparación de las medidas de 2,3% y 2,4% de humedad, la variación es muy pequeña y prácticamente en el rango de frecuencia de 1 Hz – 1 kHz la capacidad es la misma, mientras que para el rango de frecuencias de 1 mHz – 1 Hz las curvas se separan ligeramente observando un pequeño aumento de capacidad a medida que baja la frecuencia. La medida de FDS de cada muestra se realiza en días diferentes, esto influye en las condiciones en las que se realizan las medidas pudiendo ocasionar diferencias. No obstante, para las medidas con un porcentaje de humedad parecido los datos son muy similares y en gran parte esta diferencia se debe a que las muestras no contienen exactamente el mismo porcentaje de humedad.

Si se coteja las curvas de 2,4% y 3,4% de humedad, aunque la diferencia es muy pequeña para el rango de frecuencia de 1 Hz – 1 kHz se puede apreciar que la capacidad de la muestra del 3,4% es mayor. En cambio, para el rango de frecuencias de 1 mHz – 1 Hz se aprecian a simple vista que las curvas se separan, aumentando considerablemente la capacidad a medida que desciende la frecuencia.

Una vez analizado el comportamiento de la capacidad para diferentes humedades en el rango de frecuencias de 1 mHz – 1 kHz, se puede apreciar en la Figura 4–1 cómo alguna curva no sigue la misma tendencia de las demás o proporciona un dato erróneo. Se ha decidido no emplear estas curvas para los datos de referencia del sensor, ya que podrían conducir a resultados absurdos.

A continuación se representan los datos de las curvas de capacidad seleccionadas para la caracterización del sensor.

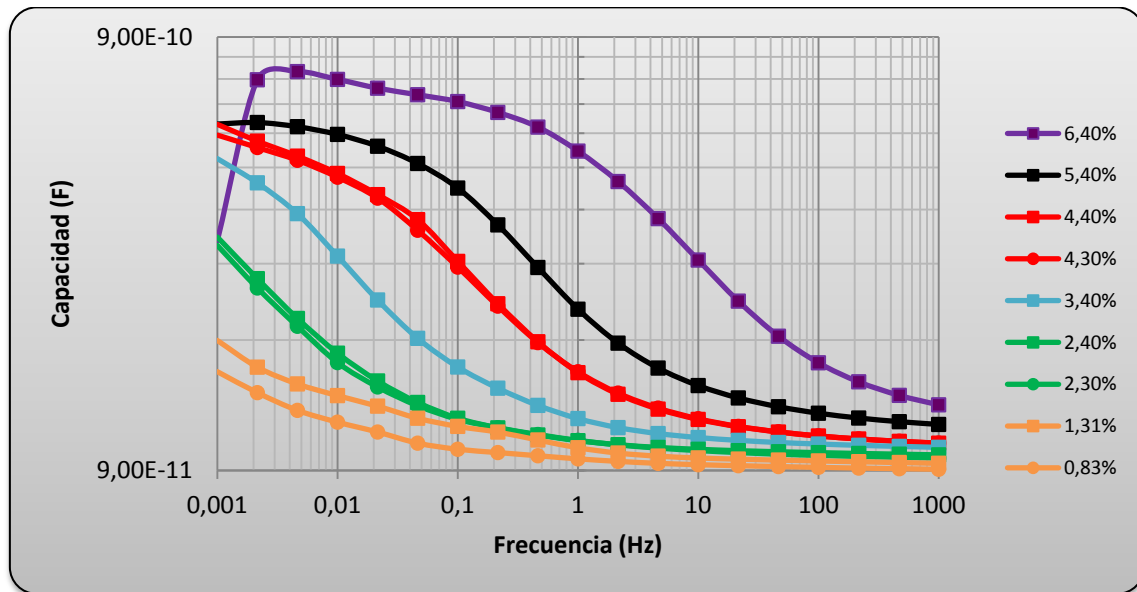


Figura 4-4 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras con distinto contenido de humedad seleccionadas para la caracterización del sensor.

Al analizar la Figura 4-4 se observa que en el último rango de frecuencias de 1 mHz - 10 mHz cabe destacar dos formas de variación de la capacidad. Para humedades entre 1% y 3% se aprecia que la capacidad aumenta de manera progresiva, mientras que para humedades del papel superiores al 3% se observa que la capacidad crece en menor medida llegando a descender. Con este hecho y las evidencias constatadas anteriormente se considera tomar el barrido de frecuencias de 10 mHz – 100 Hz, pudiendo caracterizar el sensor para variaciones más notables de la capacidad.

#### 4.1.2 Medidas de las pérdidas dieléctricas.

En este apartado se representan los datos obtenidos del IDA 200 para el estudio de las pérdidas dieléctricas, utilizando las muestras que se han seleccionado para los datos de referencia del sensor en el apartado anterior:

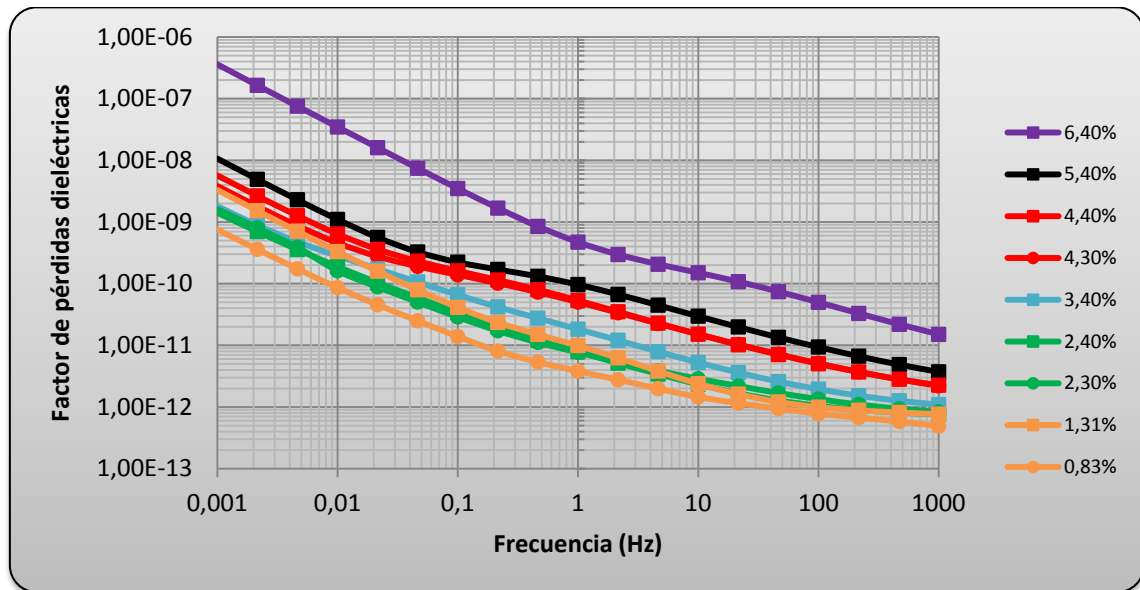


Figura 4-5 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad.

Observando los resultados en esta gráfica, se puede indicar que el crecimiento de las pérdidas dieléctricas se produce a medida que disminuye la frecuencia. En este caso el crecimiento se realiza de manera más constante.

Como se realizó en el apartado anterior se representa una sola muestra caracterizando únicamente siete puntos de frecuencia, pudiendo así determinar cómo se comporta el crecimiento de las pérdidas dieléctricas en función de la frecuencia.

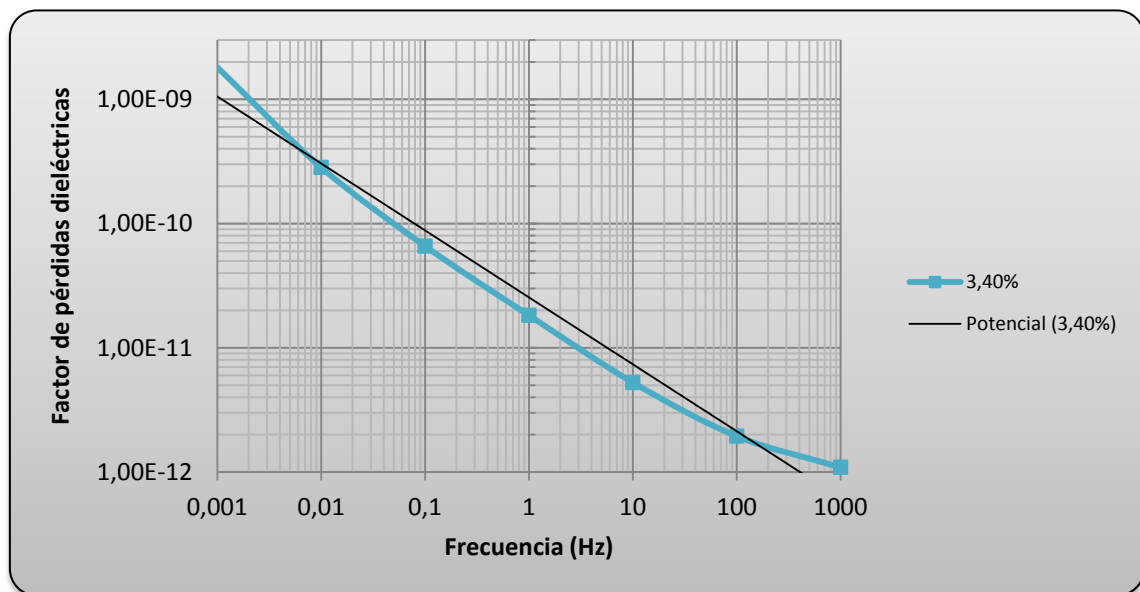


Figura 4-6 Gráfica de la curva de pérdida dieléctrica — frecuencia para una humedad del 3,4%.

En esta gráfica en la que se analiza una única muestra, se aprecia que a medida que disminuye la frecuencia las pérdidas dieléctricas aumentan. Aunque el crecimiento se realiza de una manera más constante que para las curvas de capacidad, existen tres rangos de frecuencias para los cuales el crecimiento se produce de manera diferente.

El primer rango de frecuencias abarca desde 10 Hz – 1 kHz produciendo un aumento de las pérdidas dieléctricas de manera paulatina, siendo este crecimiento el menor de los tres rangos de los datos obtenidos.

Para el siguiente rango de frecuencias comprendido entre 100 mHz – 10 Hz, se observa que el crecimiento de las pérdidas dieléctricas es constante a medida que disminuye la frecuencia. Siendo mayor que en el rango anterior.

Se aprecia que para el último rango de frecuencias de 1 mHz – 100 mHz el aumento de las pérdidas dieléctricas vuelve a crecer de manera paulatina, siendo este crecimiento mayor que en los otros dos.

Ahora se analizará el comportamiento de las pérdidas dieléctricas en función del porcentaje de humedad de la muestra. En la siguiente gráfica se pueden comparar tres humedades diferentes para analizar su comportamiento:

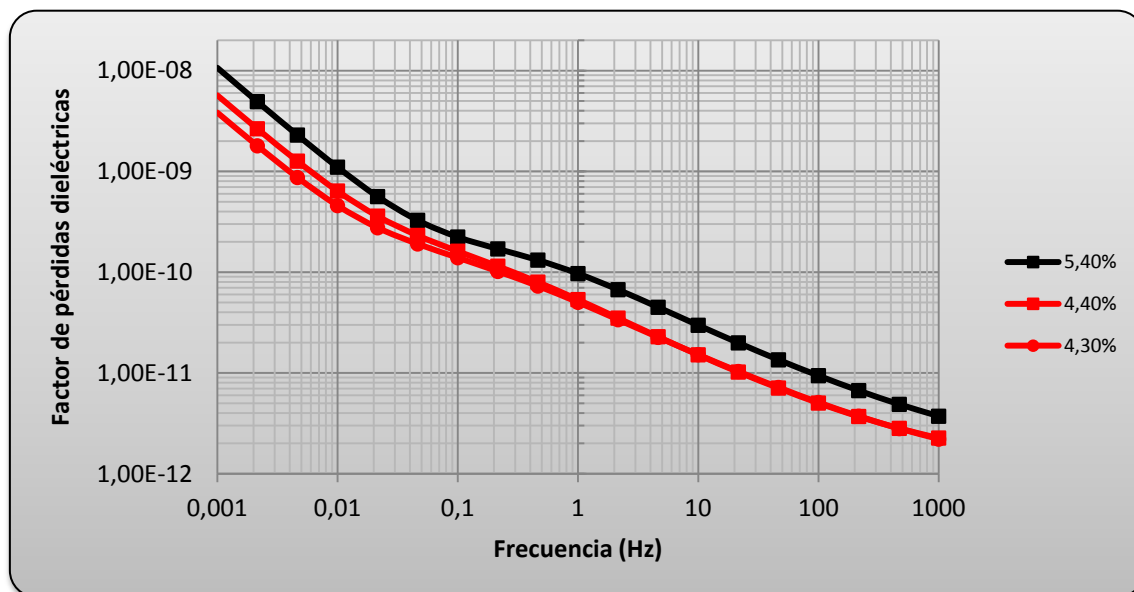


Figura 4-7 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad.



La primera comparación que se va a realizar es de las medidas de 4,3% y 4,4% de humedad, en el rango de frecuencia de 1 Hz – 1 kHz las pérdidas dieléctricas son prácticamente las mismas, en cambio, para el rango de frecuencias de 1 mHz – 1 Hz se aprecia un ligero aumento de la muestra del 4,4% de humedad respecto a la curva de 4,3% de las pérdidas dieléctricas a medida que baja la frecuencia.

Si se analizan las curvas de 4,4% y 5,4% de humedad, se puede observar que el crecimiento se produce de forma paralela. La diferencia se produce en el inicio de la medida ya que la muestra del 5,4% para 1 kHz empieza con un nivel de pérdidas dieléctricas mayor, manteniendo esta diferencia prácticamente para todo el rango de frecuencias. También se puede apreciar que para el rango de frecuencias de 100 mHz – 1 Hz en las curvas se encuentra un punto de inflexión, en la que por la parte de alta frecuencia entra en ese rango reduciendo el crecimiento y continua hacia baja frecuencia incrementando el crecimiento de las pérdidas dieléctricas.

Una vez analizado el comportamiento de las pérdidas dieléctricas para diferentes humedades seleccionadas en el apartado anterior para el rango de frecuencias de 1 mHz – 1 kHz, se puede apreciar en la Figura 4–5 como la curva de 1,31% de humedad no sigue la misma tendencia que siguen las demás. El valor de las pérdidas dieléctricas para 1 kHz parte por encima de muestras más húmedas y para 1 mHz finaliza al lado de la muestra del 4,3% de humedad por lo que se ha decidido no emplear esta curva para los datos de referencia del sensor, ya que podría conducir a resultados absurdos.

A continuación en la Figura 4–8 se representan los datos de las curvas de las pérdidas dieléctricas seleccionadas para la referencia del sensor.

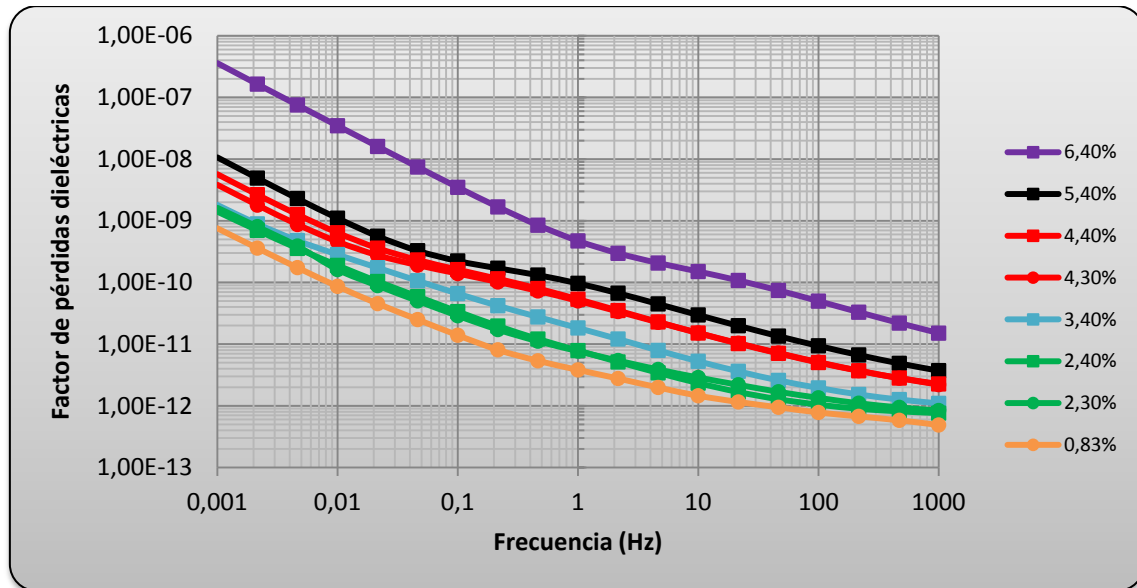


Figura 4-8 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad seleccionadas para la caracterización del sensor.

Para finalizar de razonar las curvas de las pérdidas dieléctricas es conveniente que se realice la siguiente observación:

Se puede apreciar que el punto de inflexión que realizan las curvas comentado anteriormente, varía de posición respecto al rango de frecuencia dependiendo del porcentaje de humedad de la muestra. En las muestras con menor porcentaje de humedad no se observa el punto de inflexión, mientras que a partir del 3% de humedad se aprecia el punto de inflexión. A su vez este punto a medida que aumenta el porcentaje de humedad de las muestras se desplaza hacia frecuencias más altas.

En los intervalos de frecuencia para los que se producen los puntos de inflexión las curvas de diferentes porcentajes de humedad prácticamente se solapan. Esta apreciación se debe tener en cuenta a la hora de considerar los parámetros de referencia del sensor, ya que para esos puntos de inflexión deberá tener mucha precisión o considerar un intervalo en la que en estos puntos las curvas no se solapan, permitiendo tener variaciones más notables para el sensor.

### 4.1.3 Medidas de tangente de delta.

En la siguiente gráfica se representan los datos obtenidos del IDA 200, proporcionando las curvas de la tangente de delta para todas las humedades seleccionadas en el apartado anterior:

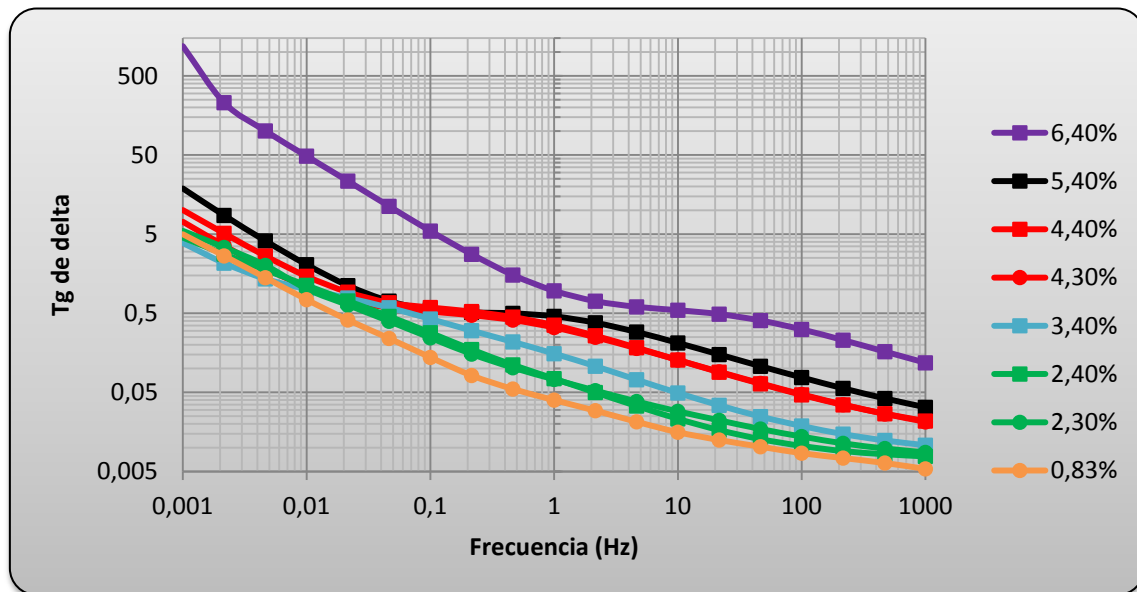


Figura 4-9 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad.

Como se puede observar en la gráfica para todas las curvas de humedades, a medida que se disminuye la frecuencia, el crecimiento de la tangente de delta tiende a aumentar. Como en el anterior apartado, se aprecia que existe un punto de inflexión en las curvas que debe ser analizado. En una primera impresión, todas las curvas presentan el mismo comportamiento con un estrangulamiento entre el 0,1 y 1 Hz, salvo la muestra del 6% de humedad que lo realiza a frecuencias más altas.

En primer lugar se analizarán dos muestras de diferente porcentaje de humedad y donde se aprecien los puntos de inflexión para poder observar la tendencia y ver cómo afectan estos puntos para la calibración del sensor.

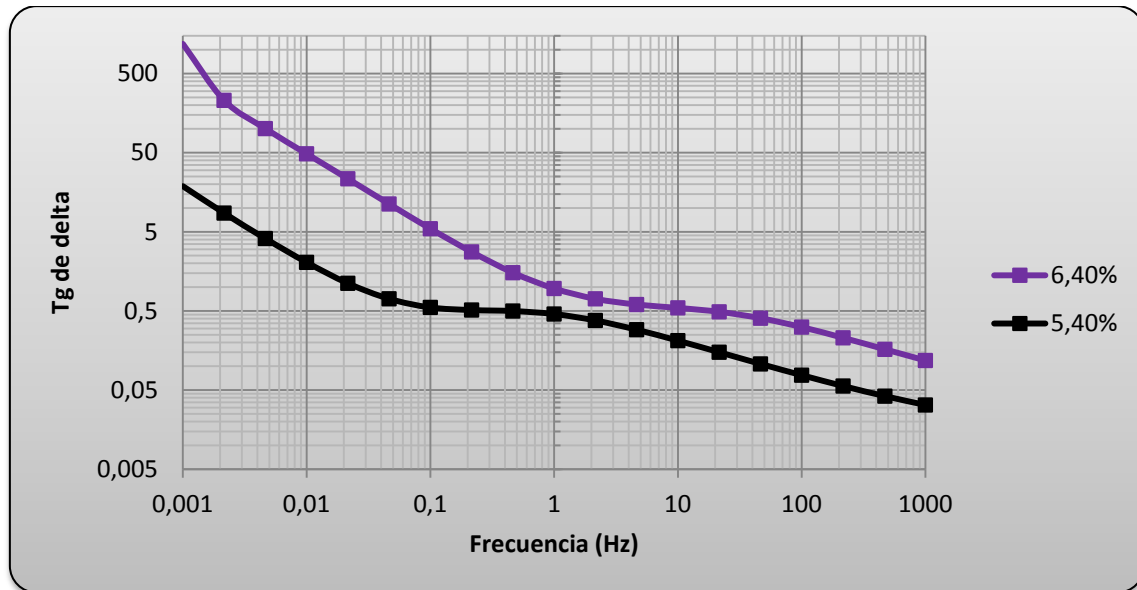


Figura 4-10 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad.

En esta gráfica se puede indicar que aparte del incremento del valor de la tangente de delta a medida que desciende la frecuencia, a su vez, también es mayor si aumentamos el porcentaje de humedad de las muestras.

Si se analiza las curvas de estas dos muestras de humedad de 6,4% y 5,4%, se aprecia que las curvas de la tangente de delta tienen varios rangos de frecuencias para el cual el crecimiento se produce de manera diferente e incluso manteniendo el valor. Considerando la muestra más húmeda, se puede observar hasta cuatro cambios en la trayectoria de la curva, mientras que para la de 5,4% únicamente se aprecian tres para el rango de frecuencias de 1 mHz – 1 kHz.

Examinando estos cambios en las muestras de alta a baja frecuencia se puede observar:

El primer tramo tiene un incremento lineal del valor de la tangente de delta hasta llegar al segundo tramo, en el que ese crecimiento se reduce llegando a mantener el mismo valor mientras la frecuencia continua bajando.

Tras mantener el mismo valor en el tramo anterior, empieza el tercero con un incremento del crecimiento mayor que en el primero.

En el último tramo realiza un incremento de la pendiente mayor que en el anterior y únicamente se puede observar para la muestra del 6,4% de humedad. Como ocurría para las curvas de la capacidad el punto de inflexión que se encuentra en el segundo tramo de los datos representados, se encuentra en diferentes rangos de frecuencia según el porcentaje de humedad de la muestra. A medida de que la muestra esté más húmeda, el punto de inflexión se desplaza a frecuencias más altas y viceversa.

En la siguiente gráfica se ha realizado un ajuste en los ejes para representar únicamente los puntos con mayor confluencia:

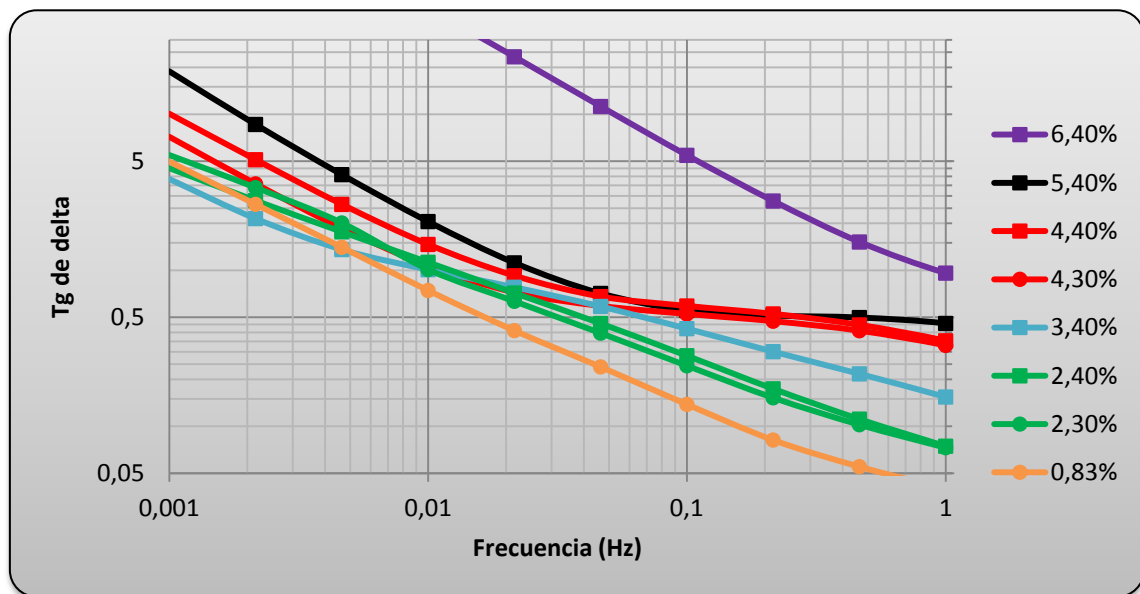


Figura 4-11 Gráfica de las curvas de  $T_g$  de delta — frecuencia para muestras con distintos contenidos de humedad en los puntos de confluencia.

En esta representación se puede observar como los tramos de las curvas en la que los valores de la tangente de delta son constantes se solapan unas sobre otras. Esto se debe tener en cuenta para los datos que se utilicen como referencias para el sensor.

## 4.2 Líneas de tendencia para las curvas de las humedades seleccionadas con frecuencia determinada.

En este apartado se pretende analizar la tendencia que tienen las características estudiadas para unas frecuencias determinadas. Con ello se consigue tener una

referencia y poder visualizar el valor de la característica para cada frecuencia y porcentaje de humedad de la muestra.

A continuación en cada apartado se representarán las líneas de tendencia de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta.

#### 4.2.1 Tendencia de la capacidad para las muestras seleccionadas con frecuencia determinada.

Estas líneas son de gran utilidad, ya que nos permiten saber o interpretar de manera visual el valor de una de las variables conociendo las otras dos. Por ejemplo, si se realiza una medida y obtenemos un valor de capacidad a una frecuencia determinada, se podría conocer aproximadamente qué porcentaje de humedad tendría la muestra.

En la siguiente gráfica se tiene la representación de las líneas de tendencia de la capacidad con una frecuencia determinada. Las muestras que se han utilizado son las seleccionadas para las referencias del sensor.

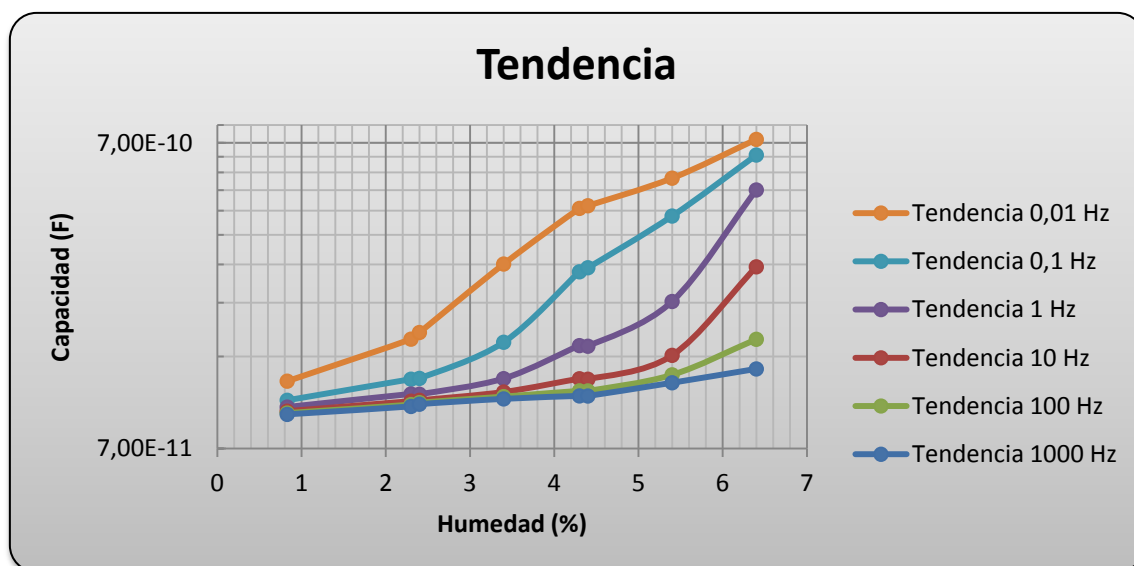


Figura 4-12 Gráfica de las curvas de tendencia de la capacidad para cada una de las frecuencias determinadas.

Se puede apreciar, como se indicó en el apartado 4.1.1, las diferentes trayectorias según la frecuencia y el porcentaje de humedad. No obstante, en esta gráfica se demuestra que a medida que aumenta la humedad y disminuye la frecuencia, la capacidad es mayor.

En esta gráfica es conveniente realizar la observación del crecimiento de la capacidad para una misma muestra de humedad. Se aprecia cómo incrementa su valor a medida que la muestra es más húmeda y también mientras la frecuencia desciende.

Se observa que para muestras con porcentaje de humedad superior al 4% y para frecuencias de 10 mHz y 100 mHz, el crecimiento de la capacidad comienza a disminuir. En cambio para muestras con humedades menores el crecimiento de la capacidad aumenta para estas frecuencias.

#### 4.2.2 Tendencia de las pérdidas dieléctricas para las muestras seleccionadas con frecuencia determinada.

De la misma manera que en el apartado anterior, conociendo dos variables se puede obtener una aproximación del valor de la restante. En este caso si se obtiene el valor de las pérdidas dieléctricas para una frecuencia determinada, también se podría conocer aproximadamente qué porcentaje de humedad tendría la muestra.

En la siguiente ilustración se tiene la representación de las líneas de tendencia para las pérdidas dieléctricas con una frecuencia determinada. Las muestras que se han utilizado son las seleccionadas para las referencias del sensor.

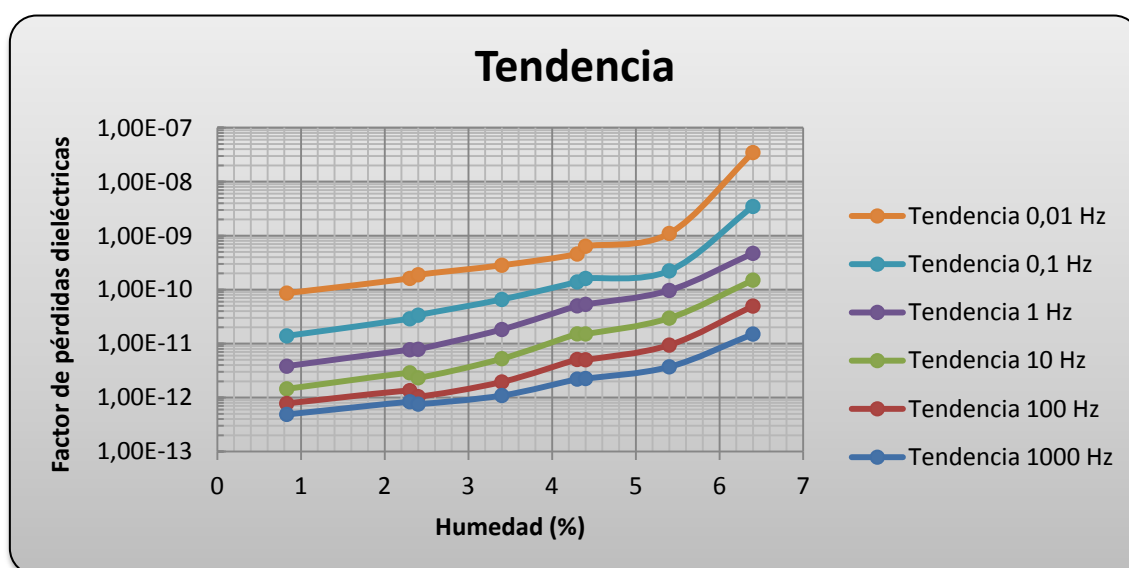


Figura 4-13 Gráfica de las curvas de tendencia de las pérdidas dieléctricas para cada una de las frecuencias determinadas.

En la Figura 4–13 se puede apreciar cómo las líneas de tendencia tienen cierto paralelismo, aumentando el crecimiento de las pérdidas dieléctricas a medida que la humedad de las muestras es mayor y la frecuencia desciende.

Con el objetivo de observar el efecto que tienen los puntos de inflexión en las líneas de tendencia de las pérdidas dieléctricas, se va analizar individualmente cada muestra de humedad.

Para las muestras de 1% y 2% se aprecia un crecimiento progresivo del valor de las pérdidas dieléctricas a medida que la frecuencia tiende a bajar.

Mientras que si se analiza el resto de muestras se puede observar algún punto en el que el crecimiento de las pérdidas dieléctricas cambia con respecto a los demás puntos. Estos cambios hacen referencia a los puntos de inflexión que se comentaron en el apartado 4.1.2. A continuación se va a indicar su posición para su mejor visualización.

Para la muestra del 3% de humedad el punto se encuentra para una frecuencia de 1 mHz, aunque ya tiene indicios en 10 mHz.

En cambio para las de 4%, 5% y 6% de humedad se pueden identificar en los puntos de 10 mHz, 100 mHz y 1 Hz respectivamente.

Con estas líneas de tendencia y el análisis de las curvas de las pérdidas dieléctricas se puede comprender la trayectoria que deben tomar, para muestras dentro del rango de humedades estudiadas.



#### 4.2.3 Tendencia de la tangente de delta para las muestras seleccionadas con frecuencia determinada.

Como en los apartados anteriores pero con los datos de la tangente de delta, conociendo el valor de dos variables se puede obtener la tercera de manera aproximada.

Para finalizar el apartado 4.2 se procede a examinar la siguiente gráfica en la que se representa las líneas de tendencia de la tangente de delta.

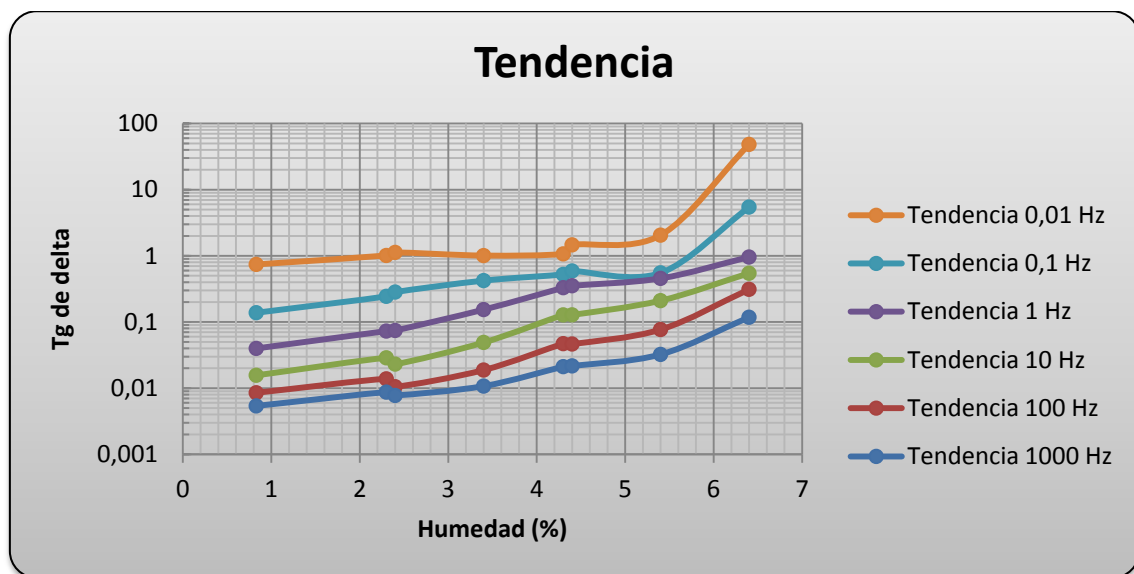


Figura 4-14 Gráfica de las curvas de tendencia de la  $T_g$  de delta para cada una de las frecuencias determinadas.

Observando la gráfica anterior y con los comentarios realizados en el punto 4.1.3, se puede apreciar en la ilustración cómo aumenta el valor de la tangente de delta a medida que la humedad de las muestras es mayor y descende la frecuencia.

Una vez que se ha visualizado la ilustración, se deben indicar los cambios en el crecimiento de la tangente de delta que se producen en los puntos de inflexión. Estos están más acentuados que los que se estudiaron en las pérdidas dieléctricas, llegando a mantener el valor de la tangente de delta en un pequeño rango de frecuencia.

Para las muestras de 1% y 2% de humedad se aprecia un crecimiento progresivo de la tangente de delta a medida que descende la frecuencia. Aunque de manera muy leve, se

puede observar para la humedad del 2% en las gráficas 4-9 y 4-14 que el punto de inflexión se encuentra en 1 mHz.

En el resto de muestras se puede apreciar de manera más evidente dónde se realizan estos cambios e indicar los puntos de inflexión. Para humedades de 3%, 4% y 6% se pueden identificar los puntos para las frecuencias de 10 mHz, 100 mHz y 10 Hz respectivamente. Mientras que para la muestra de humedad del 5% este punto se encuentra en el rango de frecuencia de 100 mHz – 1 Hz.

#### 4.3 Repetividad de las medidas para diferente rango de frecuencias.

Como se indicó en el apartado 3.3 en el procedimiento de medida, se ejecutan dos medidas de FDS para todas las muestras con un rango de frecuencia diferente. Al no variar las condiciones en las que se han realizado las medidas, estas deben coincidir, por lo que se comete una primera medida FDS con un rango de frecuencia de 10 mHz – 1 kHz con una duración entorno a ocho minutos. Una vez finalizada se analizan los datos obtenidos en el IDA 200 para determinar que los valores se encuentran comprendidos entre los datos obtenidos en las medidas de pruebas con diferentes porcentajes de humedad. Tras haber verificado que la medida se ha ejecutado correctamente y las conexiones están bien realizadas, se toma la segunda medida con un rango de frecuencia de 1 mHz – 1 kHz y se comprueban los datos con los obtenidos en la medida anterior.

A continuación se representan las gráficas con los datos de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta para la muestra de humedad del 4,4% y dos rangos de frecuencia, uno de 1 mHz – 1 kHz y otro de 10 mHz – 1 kHz.

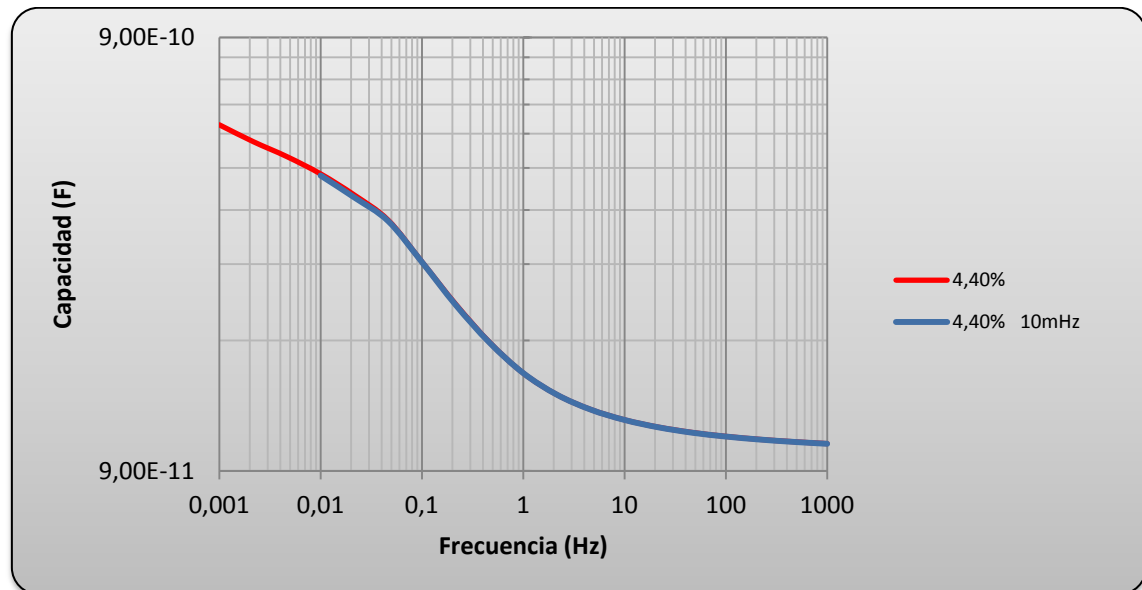


Figura 4-15 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para una humedad del 4,4% y varios rangos de frecuencia.

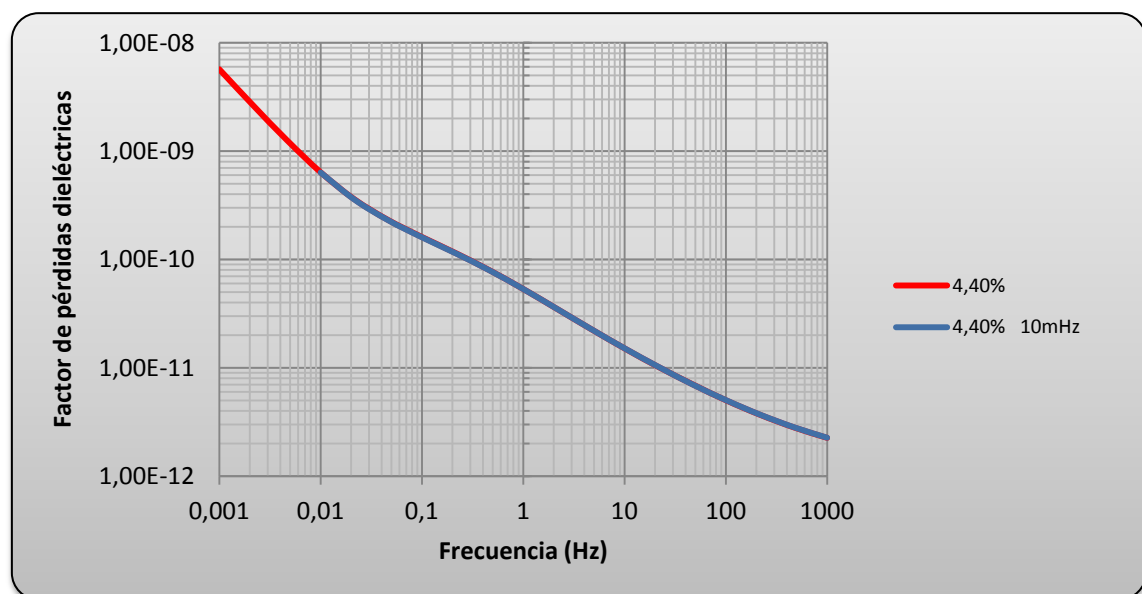


Figura 4-16 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para una humedad del 4,4% y varios rangos de frecuencia.

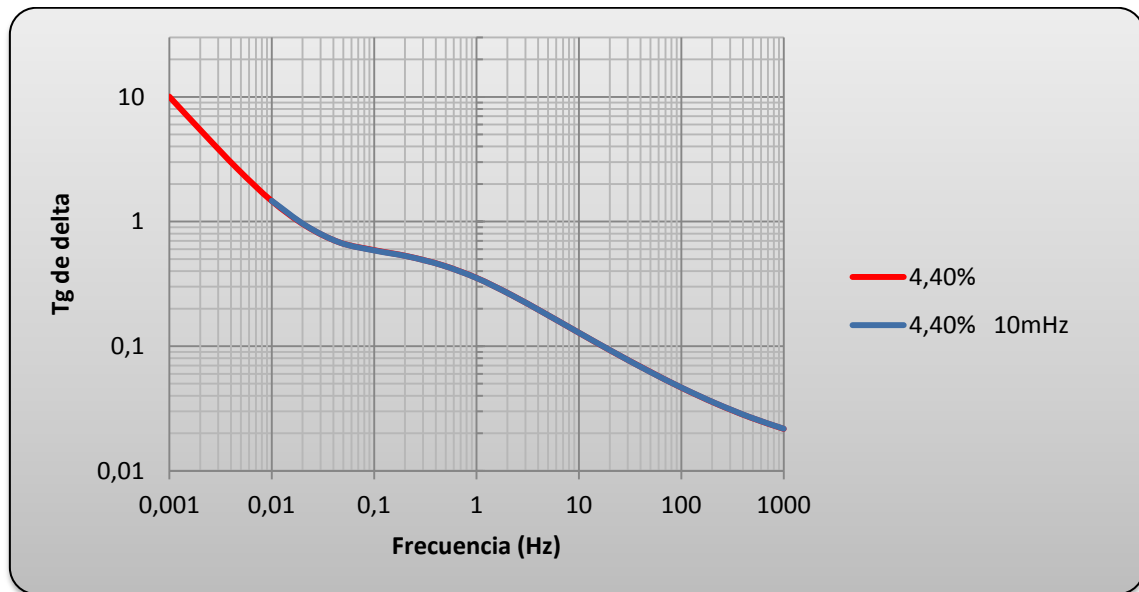


Figura 4-17 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para una humedad del 4,4% y varios rangos de frecuencia.

Observando las tres gráficas, se puede comprobar que en el rango de frecuencias que coinciden estas dos medidas las líneas se solapan unas encima de otras, prácticamente en su totalidad. Esto nos indica que las medidas se han realizado correctamente ya que se encuentran con valores comprendidos son coherentes con el resto de medidas teniendo en cuenta el porcentaje de humedad de la muestra e iguales para dos barridos de frecuencia.

Que los valores de las medidas coincidan no implica que se hayan realizado correctamente, ya que en el caso de no haber conectado bien los electrodos en el portamuestras, las medidas también podrían salir idénticas, pero tanto la trayectoria como los valores obtenidos no serían coherentes con el resto de muestras con parecido contenido de humedad, por lo que se deberá revisar las conexiones y el equipo IDA 200 para repetir las medidas.

## **5 Comparación de las medidas sobre papel impregnado con aceite mineral con las medidas sobre papel impregnado con aceite vegetal.**

Este proyecto se ha realizado de manera paralela con otro estudio, donde el aislamiento líquido ( aceite mineral ) es sustituido por un aceite vegetal con diferentes características y propiedades.

El estudio elaborado con aceite vegetal se ha realizado siguiendo el mismo procedimiento experimental utilizado en este proyecto con aceite mineral, el cual se encuentra explicado en el apartado 3 de este documento.

Con esta comparación se pretende analizar la variación de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta con la humedad en el aislamiento sólido de los transformadores, que se encuentran impregnados con dos tipos de aislamiento líquido.

A continuación se realiza una comparación de las principales propiedades de los dos aceites utilizados y sus ventajas e inconvenientes. La tabla de datos con las partes por millón de agua en el aceite vegetal antes y después de medir FDS, el porcentaje de humedad de las muestras y la duración de la medida. Y por último se compara los datos obtenidos en las medidas realizadas con aceite vegetal para las diferentes características estudiadas; la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta

### **5.1 Comparación de las propiedades del aceite mineral y del aceite vegetal utilizados en el estudio.**

En primer lugar se deben comparar las características de los dos aceites que se han utilizado para este estudio. Para el vegetal se ha recurrido al aceite Biotemp, fabricado por ABB [16], y para el mineral como se señaló en el apartado anterior se ha utilizado el aceite mineral Nytro Taurus de Nynas [8].

A continuación se exponen las principales ventajas y desventajas de las propiedades entre estos dos tipos de aislantes.

<i><b>PROPIEDAD</b></i>	<i><b>ACEITE MINERAL</b></i>	<i><b>ACEITE VEGETAL</b></i>
<i>Componentes</i>	Mezcla de hidrocarburos	Ester natural de plantas
<i>Biodegradabilidad</i>	Lenta	Rápida
<i>Punto de inflamación</i>	>140 °C	>340 °C
<i>Viscosidad (40 °C)</i>	10 mm <sup>2</sup> /s	42 mm <sup>2</sup> /s
<i>Coefficiente de dilatación</i>	7.55x10 <sup>-4</sup> /°C	7,5x10 <sup>-4</sup> /°C

**Tabla 5-1 Especificaciones de cada uno de los dos aceites. Tomado de [8, 16].**

La primera diferencia entre el aceite mineral y el vegetal se encuentra en el origen de cada uno. Mientras que el mineral procede de los hidrocarburos, el origen del aceite vegetal se encuentra en las plantas. Esto conlleva a que al ser el aceite mineral un derivado del petróleo, tiene disponibilidad limitada y su precio de venta varía según el del petróleo.

Una de las principales ventajas que tiene el aceite vegetal, es que al provenir de materias primas renovables es fácilmente biodegradable con un índice mayor al 97% frente al 25.2% del mineral en 21 días. Los residuos del aceite mineral son muy contaminantes y no deben ser vertidos al medio ambiente.

Cuando se producen arcos eléctricos en el interior del transformador, el aceite se descompone produciendo gases. El aceite vegetal únicamente produce un 15% de los gases que se descomponen en el mineral.

También tiene ventaja este aceite vegetal frente al mineral en el punto de inflamación, con una temperatura de inflamación de 340 °C respecto a los 140 °C del aceite mineral utilizado. Esta propiedad es una característica importante para disminuir las probabilidades de incendio y explosión en los transformadores.

En cambio aunque tiene un calor específico mayor, tiene menor capacidad de refrigeración en la aplicación en transformadores ya que tiene un índice de viscosidad de  $42 \text{ mm}^2/\text{s}$  frente al  $10 \text{ mm}^2/\text{s}$  que tiene el aceite mineral.

El aceite vegetal gracias a su composición de esteres tiene límites mayores de saturación del agua entre 5 y 8 veces de la que tiene el aceite mineral. Al tener mayor afinidad por el agua le permite al papel aislante retener menos porcentaje de humedad. Por ello, el nivel de humedad permisible en aceite vegetal es mayor que el del mineral.

Sin embargo, los aislantes vegetales presentan una desventaja frente a los aceites minerales, ya que tienen mayor sensibilidad a los fenómenos de oxidación en presencia del oxígeno y el aumento de temperaturas activa la reacción de oxidación. Esto conlleva que el aislante incremente su índice de viscosidad y consecuentemente como se comentó anteriormente empeorando su capacidad de refrigeración. También se forman depósitos granulosos llegando a formar lodos, y la producción de ácidos.

En los últimos estudios que se han realizado, se demuestra que el aceite vegetal usado en transformadores prolonga la vida del papel aislante considerablemente más que el aceite mineral, ya que proporciona al papel un envejecimiento más lento.

## 5.2 Medidas de las diferentes humedades en aceite vegetal.

En la tabla 5-2 se exponen los datos del control que se ha realizado para las medidas de las muestras impregnadas en aceite vegetal, para poder hacer una comparación con el análisis que se ha realizado para las medidas en aceite mineral. Las partes por millón de agua en el aceite antes y después de medir FDS, el porcentaje de humedad de las muestras y la duración de la medida.

	<i>Humedad en el aceite antes de medir FDS (ppm)</i>	<i>Humedad en el aceite después de medir FDS (ppm)</i>	<i>Medida de humedad en el papel (%)</i>	<i>Duración de la medida (h min s)</i>
<i>Primera medida 1% humedad</i>	124,5	126,3	1,20	1:04:30
<i>Segunda medida 1% humedad</i>	128,3	129,5	1,36	1:06:01
<i>Primera medida 2% humedad</i>	193,2	214,5	2,14	1:05:04
<i>Segunda medida 2% humedad</i>	197,8	215,1	2,13	1:06:07
<i>Primera medida 3% humedad</i>	245,5	269,7	3,31	1:06:38
<i>Segunda medida 3% humedad</i>	252,0	265,9	3,26	1:06:46
<i>Primera medida 4% humedad</i>	276,0	280,7	4,11	1:15:25
<i>Segunda medida 4% humedad</i>	274,5	282,6	4,15	1:10:42
<i>Primera medida 5% humedad</i>	288,5	281,7	5,16	1:05:17
<i>Segunda medida 5% humedad</i>	292,9	285,7	5,10	1:05:23
<i>Primera medida 6% humedad</i>	315,6	393,6	6,26	1:04:52
<i>Segunda medida 6% humedad</i>	319,3	293,4	6,18	1:05:17

**Tabla 5-2 Datos del control de cada medida de todas las muestras de humedad impregnadas en aceite vegetal.**

Como se observa en esta tabla, las partes por millón de agua contenida en el aceite vegetal aumentan a medida que transcurren los días en los que se realizan los ensayos y también al efectuar las medidas de FDS. Si se compara con la humedad del aceite mineral en la tabla 4–1, en el aceite vegetal se encuentra un índice de partes por millón significativamente mayor por las características de este aislante.

Para estas muestras el tiempo que tarda el equipo IDA 200 en realizar las medidas de FDS, se asemeja al que tardaba en hacerlas en aceite mineral. En la medida del 4% de humedad se aprecia un periodo de tiempo superior al resto, esto se debe al calentamiento del equipo ya que las medidas se realizaron un día muy caluroso afectando al rendimiento del equipo.



En cambio si se comparan los porcentajes de humedad contenida en las muestras de aceite vegetal realizadas con Karl Fischer, se observa que para estas muestras de aceite vegetal son más parejas que las obtenidas para el aceite mineral ya que para algunos porcentajes de humedad las muestras son más distantes.

En los siguientes apartados se exponen los datos obtenidos de las muestras impregnadas en aceite vegetal para la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta representados en gráficos para realizar la comparación con los datos obtenidos en el aceite mineral.

### 5.2.1 Comparación de las medidas de la capacidad.

La primera característica que se procede a comparar es la capacidad. En la siguiente ilustración se representan los datos obtenidos de la capacidad para las muestras impregnadas en aceite vegetal.

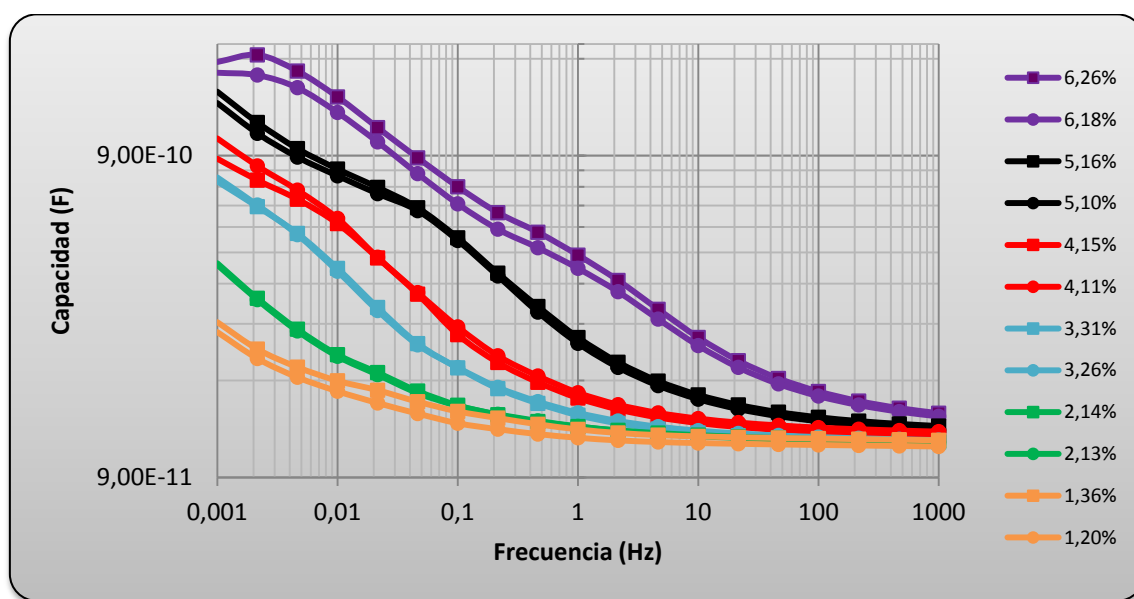


Figura 5-1 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras impregnadas en aceite vegetal con distintos contenidos de humedad.

Para poder comparar las curvas de la capacidad obtenidas para los dos tipos de aceites, se deben visualizar las dos representaciones con los mismos valores en los ejes de las gráficas. Para su comparación se analizan las Figuras 5–1 y 5–2.

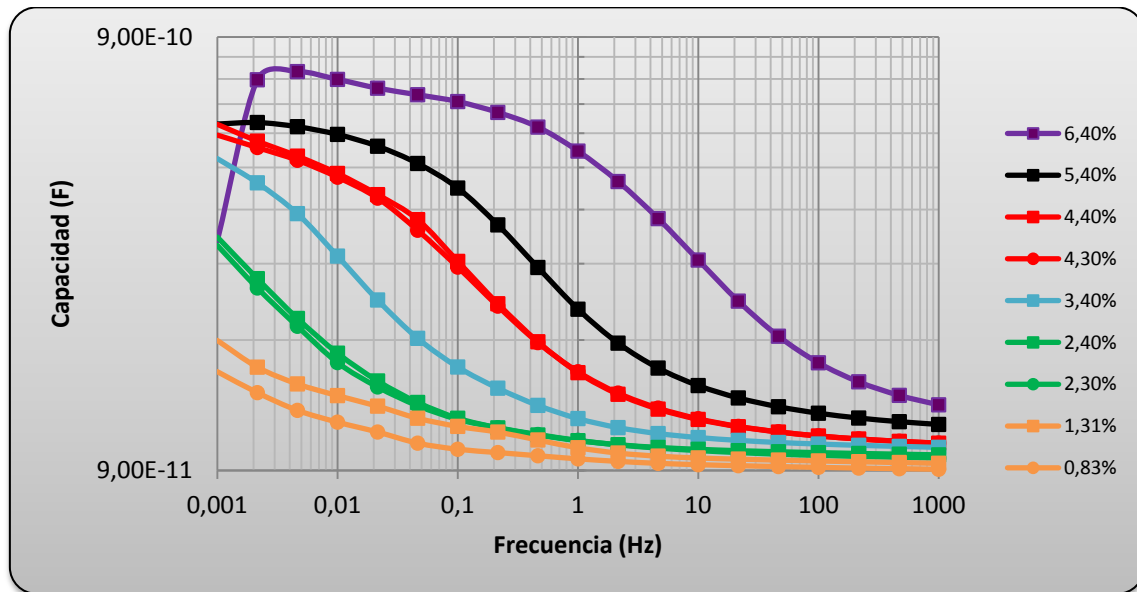


Figura 5-2 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral con distintos contenidos de humedad seleccionados para la caracterización del sensor.

Observando las gráficas se aprecia cómo las curvas de la capacidad para el aceite vegetal realizan prácticamente la misma tendencia que para el mineral. La diferencia más significativa se puede encontrar en el rango de frecuencia de 1 mHz – 1 Hz, especialmente para las muestras superiores al 2% de humedad, donde el crecimiento de la capacidad no tiende a disminuir de manera progresiva como ocurre para las muestras impregnadas en aceite mineral.

Para poder analizar las diferencias de las curvas de capacidad de estos dos tipos de aceites con mayor precisión, se representan tres porcentajes de humedad ( 1%, 4% y 6% ) de los dos aislantes en una misma gráfica.

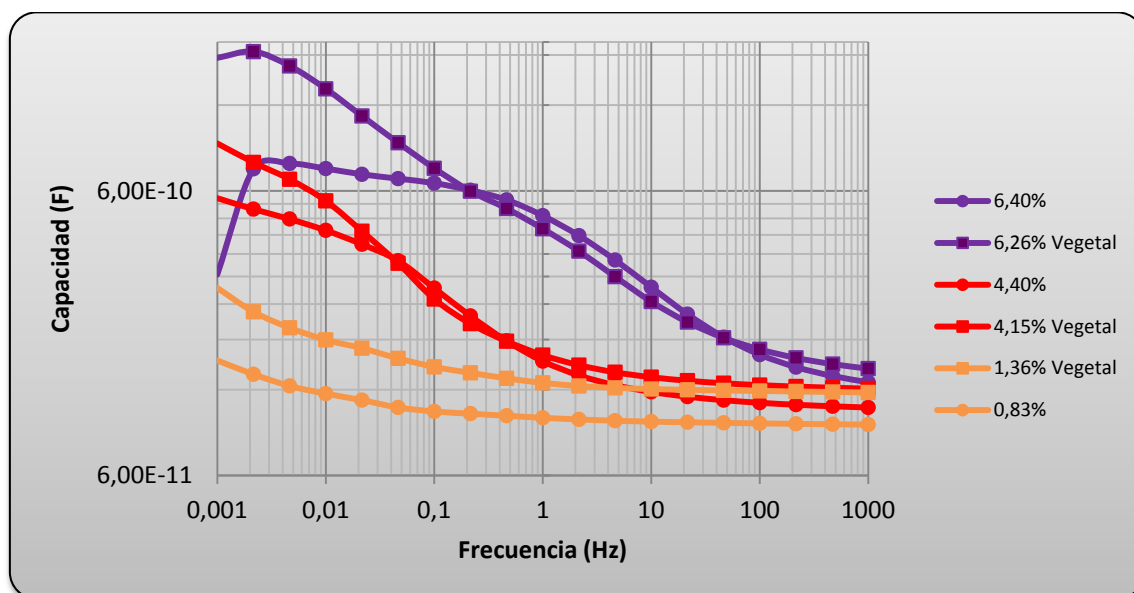


Figura 5-3 Gráfica de las curvas de capacidad — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral y vegetal con un contenido de humedad del 1%, 4% y 6%.

Si se analizan los valores de la capacidad en el aceite vegetal, se observa que inician desde la frecuencia de 1 kHz por encima de los valores del mineral, teniendo en cuenta que las muestras del aceite mineral para los contenidos de humedad del 4% y 6% son mayores que los del vegetal. Esta diferencia es mayor para la comparación de las muestras de 1% que se debe a una diferencia considerable en el contenido de humedad de las muestras.

Si se observan las muestras del 4% y 6% de humedad en el rango de frecuencias de 0,1 Hz – 100 Hz, se puede apreciar a medida que se disminuye la frecuencia como los valores de la capacidad de las medidas de aceite mineral aumentan el crecimiento incluso superando los valores del obtenidos en el aceite mineral.

Pero como se indicó anteriormente la diferencia más destacada se produce en el rango de frecuencias de 1 mHz – 100 mHz, donde se aprecia un mayor crecimiento de la capacidad en el aceite vegetal, obteniendo un valor considerablemente mayor para la última frecuencia medida.

Esta diferencia de capacidad entre ambos aislantes es debida a la composición de esteres del aceite vegetal. Observando la Tabla 5–1, se puede comprobar cómo la humedad

contenida en el aceite vegetal es mayor, esto conlleva a que el valor de la capacidad sea mayor inicialmente a altas frecuencias y aumente esta diferencia en el rango de frecuencias de 1 mHz – 100 mHz con el aceite mineral a medida que desciende la frecuencia.

### 5.2.2 Comparación de las medidas de las pérdidas dieléctricas.

En este apartado se analizan las pérdidas dieléctricas del aceite vegetal para su comparación con el aceite mineral. A continuación se representan en la siguiente gráfica los datos obtenidos de las pérdidas dieléctricas para las muestras impregnadas en aceite vegetal.

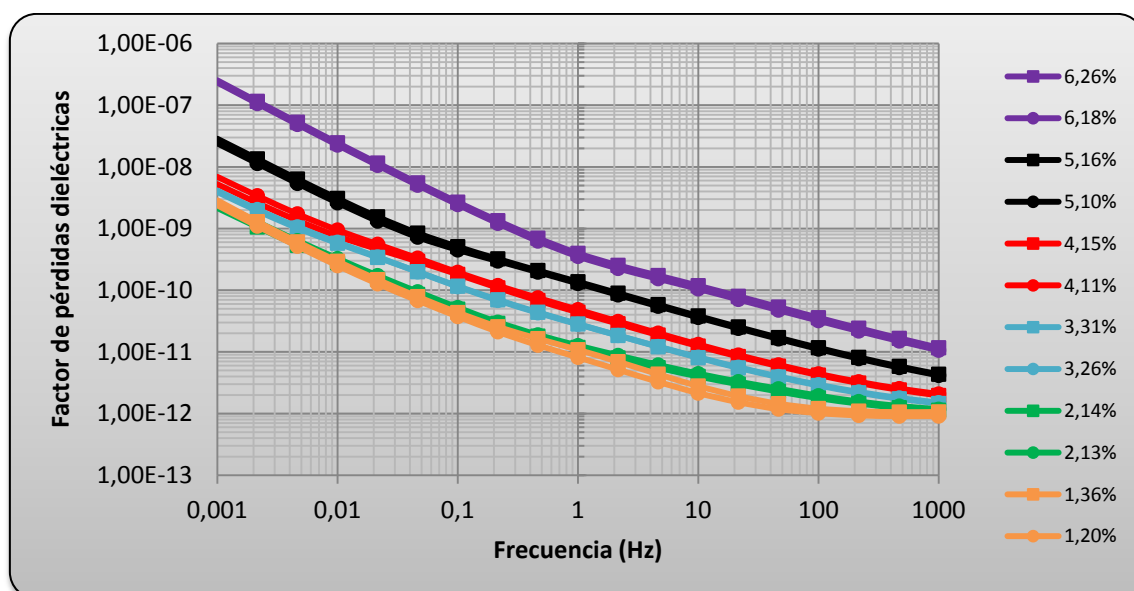


Figura 5-4 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras impregnadas en aceite vegetal con distintos contenidos de humedad.

Como se realizó en el apartado anterior, se procede a comparar los datos de las pérdidas dieléctricas de las Figuras 5–3 y 5–4 con los mismos valores en los ejes de las gráficas.

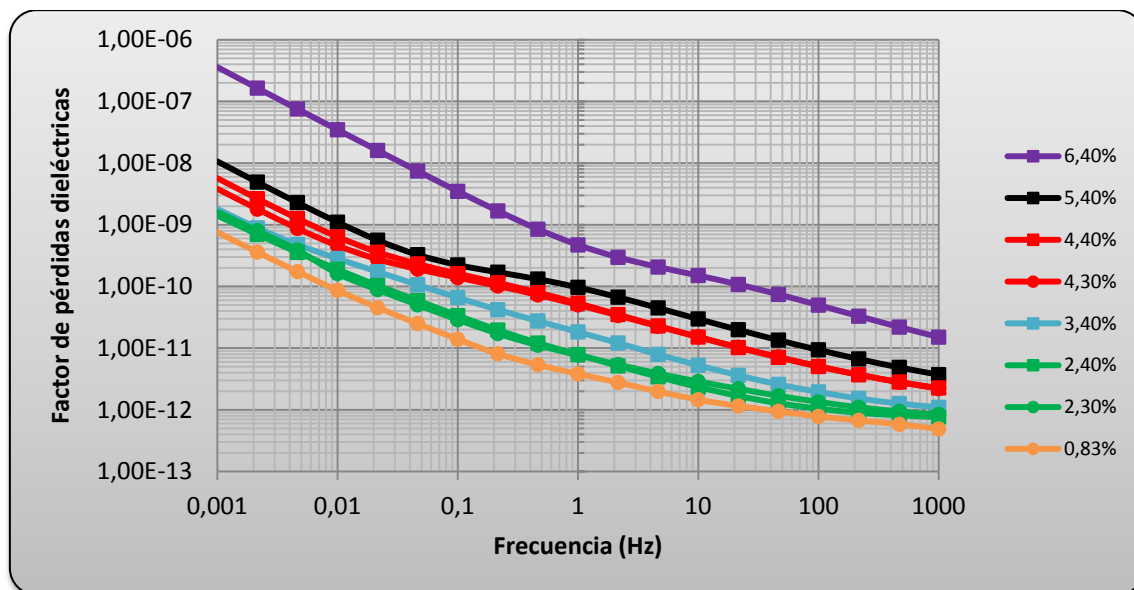


Figura 5-5 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral con distintos contenidos de humedad seleccionados para la caracterización del sensor.

Analizando las curvas obtenidas para las muestras impregnadas en aceite vegetal, se puede apreciar cómo se ajustan a las trayectorias que realizan las medidas en el aceite mineral.

Igual que en el apartado anterior, se representan las curvas de las pérdidas dieléctricas para tres porcentajes de humedad ( 1%, 4% y 6% ) de los dos aislantes en una misma gráfica.

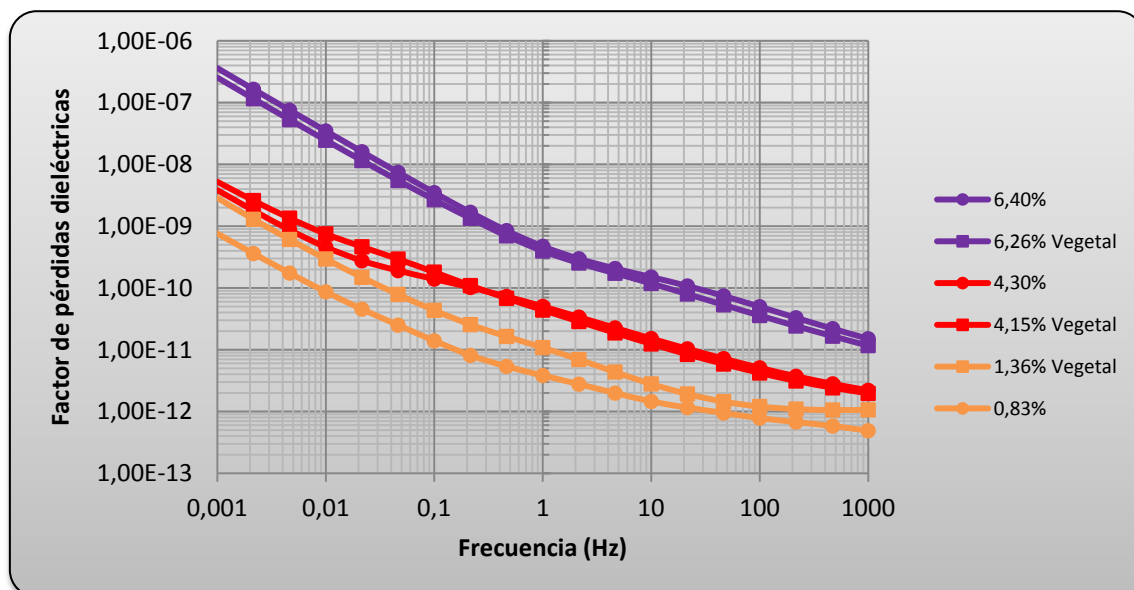


Figura 5-6 Gráfica de las curvas de pérdidas dieléctricas — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral y vegetal con un contenido de humedad del 1%, 4% y 6%.

Para esta característica las diferencias son menores, si se observa los valores que alcanzan las curvas para ambos líquidos se puede apreciar alguna pequeña diferencia.

Inicialmente los valores que se obtienen de las pérdidas dieléctricas dependen del contenido de humedad de las muestras, siendo este valor mayor a medida que aumenta el contenido de humedad de las muestras independientemente del aceite utilizado.

A medida que desciende la frecuencia las pérdidas dieléctricas aumentan de manera aproximadamente lineal. Sin embargo se observa como las curvas se cruzan para las muestras del 4%, esto puede ser debido a que el punto de inflexión de la muestra de aceite mineral produce un crecimiento menor que la de la muestra del aceite vegetal para esta muestra. Si nos fijamos en la Figuras 5–4 se observa que para los valores obtenidos para el aceite vegetal prácticamente no existe este punto de inflexión.

### 5.2.3 Comparación de las medidas de la tangente de delta.

Para finalizar este apartado, se procede a comparar la última característica que se ha analizado en este documento. En la siguiente ilustración se representan los datos obtenidos por el equipo IDA 200 de la tangente de delta para muestras impregnadas en aceite vegetal.

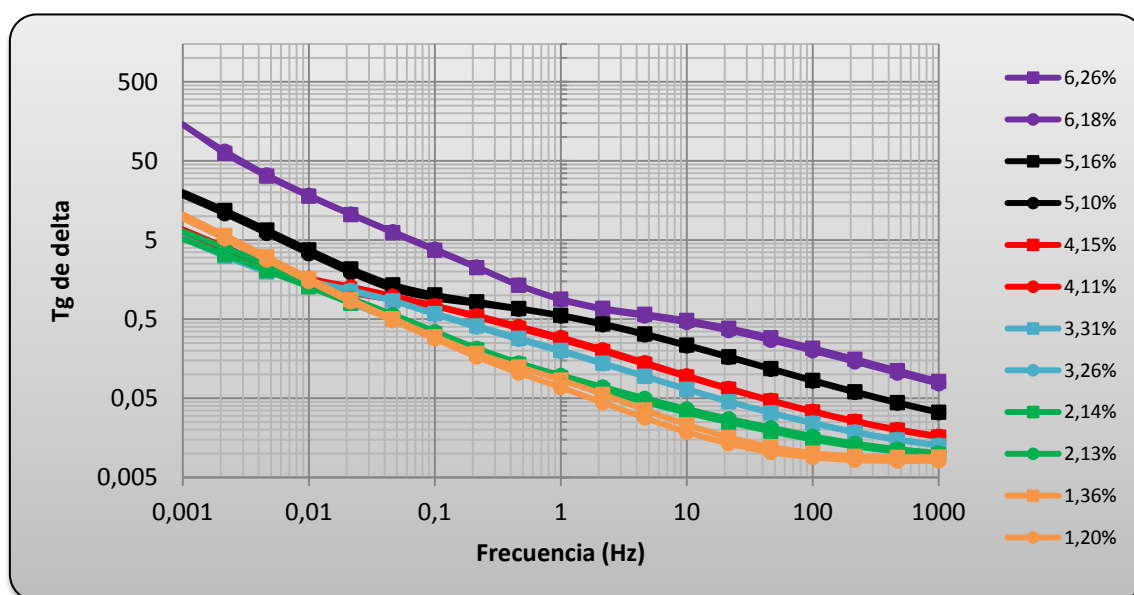


Figura 5-7 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras impregnadas en aceite vegetal con distintos contenidos de humedad.

De la misma forma que en los apartados anteriores, se comparan los datos de la tangente de delta en las Figuras 5-5 y 5-6 con las mismas escalas en los ejes de las gráficas.

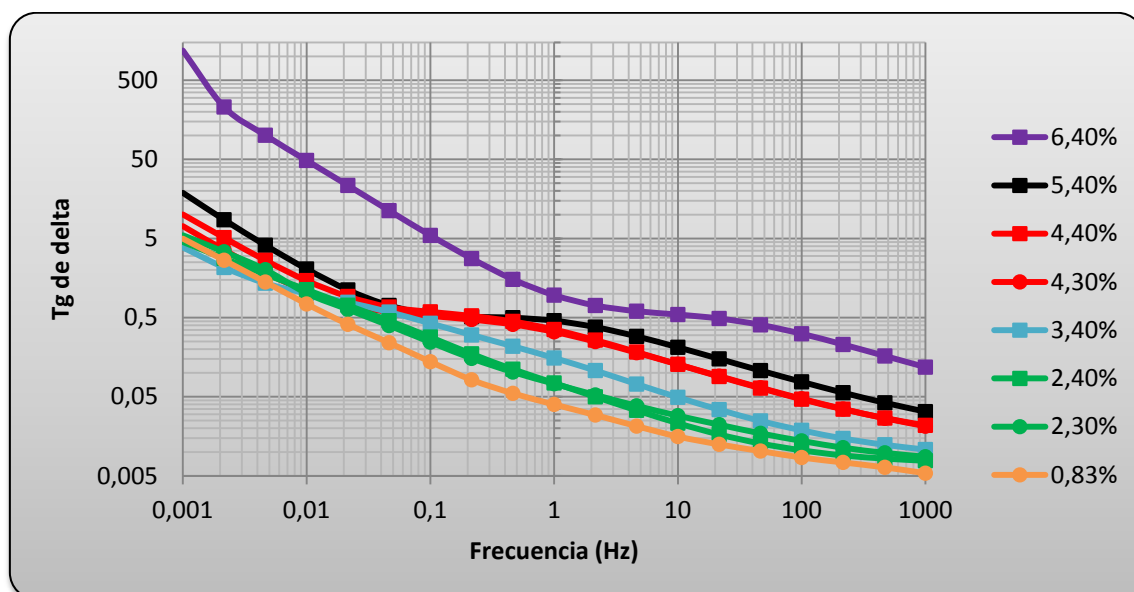


Figura 5-8 Gráfica de las curvas de Tg de delta — frecuencia para muestras impregnadas en aceite mineral con distintos contenidos de humedad.

Si se analizan las curvas de las muestras impregnadas en aceite vegetal, se asemejan al crecimiento de la tangente de delta que se analizó para las del mineral. Observando las representaciones de los datos de ambos aceites se puede apreciar cómo las curvas tienen las mismas tendencias. Comparando los valores que alcanzan estas muestras, únicamente se pueden distinguir por las diferencias en los porcentajes de humedad.

En el único tramo en el que se observa una diferencia significativa, es en los puntos de inflexión que se estudiaron en el apartado de la tangente de delta. Estos puntos para las muestras impregnadas en aceite vegetal se realizan de una manera en la cual el valor de la tangente de delta no se mantiene constante durante un pequeño rango de frecuencia como ocurre en el aceite mineral.

## 6 Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido estudiar la variación de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta, frente a la humedad contenida en el aislamiento eléctrico en un rango de frecuencia de 1 mHz – 1 kHz. Este análisis se ha realizado a través de la respuesta dieléctrica del aislamiento mediante la técnica de espectroscopia dieléctrica en el dominio de la frecuencia.

A partir de las medidas de FDS realizadas, se han podido obtener las siguientes conclusiones:

Se ha comprobado que a medida que se aumenta el porcentaje de humedad en el papel impregnado en aceite, se obtiene un incremento de los valores de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta. Este aumento también se ve afectado por la frecuencia, ya que a medida que disminuye, los valores de las propiedades estudiadas aumentan. No obstante, este crecimiento es diferente para cada propiedad, incluso para una misma característica el crecimiento cambia a medida que desciende la frecuencia.

Gracias al procedimiento de medida, la preparación de las muestras y la metodología utilizada, se han proporcionado unos datos de referencia del sensor con una buena sensibilidad en el rango de humedad típico de un transformador real para las tres propiedades estudiadas.

Con este estudio se ha podido comprobar que se pueden realizar medidas FDS con una buena respuesta dieléctrica mediante la utilización como electrodo de una malla metálica. Con este resultado, la línea de investigación del departamento de ingeniería eléctrica puede continuar la investigación en la realización de medidas de FDS para muestras con contenido de humedad variable, gracias a la malla metálica que permite variaciones de humedad del sistema de aislamiento papel-aceite.



## 7 Bibliografía

- [1] **Juan Carlos Burgos**; Apuntes de la asignatura circuitos magnéticos y transformadores. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid.
- [2] **Diego Fernando García Gómez**; Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid. Mayo 2012.
- [3] **Pedro Reis Tenajas**; Análisis del envejecimiento del aceite de un transformador mediante espectroscopia dieléctrica medida en baja frecuencia. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid.
- [4] **Lorena Vizcaíno Moreno**; Influencia de la humedad y la temperatura en las características dieléctricas del papel Kraft. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid. Junio 2009.
- [5] **Wikipedia**; Estructura de la glucosa y celulosa.  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/Estructura\\_celulosa.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/Estructura_celulosa.png)
- [6] **CIGRÉ**; Mantenimiento moderno en transformadores de potencia. CIGRÉ A2 -110. Mayo 2009.
- [7] **Valentín Martín Suárez**; Evaluación del riesgo de incendio de un transformador. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid. Noviembre 2009.
- [8] **NYNAS**; Propiedades del aceite mineral Nytro Taurus. Diciembre 2012.
- [9] **MEGGER**; Nuevas tecnologías de evaluación de la condición de transformadores de potencia. Espectroscopia en el dominio de frecuencia. Octubre 2012.

[10] **CIGRÉ**; Experiencias en diagnóstico de aislamiento aceite-papel con espectroscopia dieléctrica en el dominio de la frecuencia. CIGRÉ A2-81. Marzo 2012.

[11] **CIGRÉ**; Espectroscopia dieléctrica en el dominio de la frecuencia como herramienta de diagnóstico del aceite dieléctrico. CIGRÉ A2-19. Mayo 2009.

[12] **Unión Fenosa**; Mantenimiento integral de transformadores de potencia. Marzo 1998.

[13] **Wikipedia**; Capacidad eléctrica.

[http://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad\\_el%C3%A9ctrica](http://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad_el%C3%A9ctrica)

[14] **User's Manual IDA200**.

[15] **Belén García, Guillermo Robles, Diego F. García**; Moisture sensor to characterize transformer solid insulations in transformers under non-equilibrium conditions. 11th IEEE ICSD International Conference on Solid Dielectrics, Bologna (Italy), Jul 1-4, 2013.

[16] **ABB**; BIOTEMP – ABB sensible solution. The superior biodegradable, high fire point dielectric insulating fluid. 2010.